

UNIVERSIDAD DE PANAMA

VICERRECTORIA DE INVESTIGACION Y POSTGRADO

**ESTUDIO PRELIMINAR HIDROGEOFISICO DE INTRUSIÓN SALINA EN
EL ACUIFERO COSTERO DE PUNTA CHAME**

PREPARADO POR

GUILLERMO BURKE

**TESIS PRESENTADA COMO
UNO DE LOS REQUISITOS
PARA OPTAR POR EL GRADO
DE MAESTRO EN CIENCIAS
FISICAS**

PANAMA REPUBLICA DE PANAMA

MAYO 2014



Titulo de la Tesis: **"Modelo Hidrogeofísico de Intrusión Salina en el Acuífero Costero de Punta Chame"**

TESIS

Sometida para optar al título de Maestría en CIENCIAS FÍSICAS

Vicerrectoría de Investigación y Postgrado

Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología

APROBADO POR:

Mgtr. Moisés Ortega
Presidente

Doctor César Garrido
Miembro

Mgtr. Ricardo Bolaños
Miembro

REFRENDADO POR:

**REPRESENTANTE DE LA VICERRECTORÍA
DE INVESTIGACIÓN Y POSTGRADO**

FECHA:



DEDICATORIA

ÉSTE TRABAJO SE LO DEDICO A MI FAMILIA, INSPIRADO EN SU FORTALEZA, SUPO BRINDARME ESE CARÍÑO Y APOYO INCONDICIONAL QUE SÓLO UNA FAMILIA SABE BRINDAR, Y CON ELLO LOGRAR LA FINALIZACIÓN DE ÉSTE TRABAJO DE TESIS DE POSTGRADO.

AGRADECIMIENTOS

A Dios Todopoderoso que con su infinita misericordia, me brindó la oportunidad de culminar mi trabajo de graduación de postgrado.

A la Secretaría Nacional de Ciencias y Tecnología (SENACYT) por brindarme parte del financiamiento de este proyecto de investigación; al Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), por su apoyo con la Beca para realizar el Curso Internacional de Hidrología de Agua Subterránea en la Universidad de la República de Uruguay; al Centro de Investigaciones con Técnicas Nucleares (CITEN) de la Universidad de Panamá, por los análisis químicos de las muestras de aguas y brindarnos el centro de investigaciones para desarrollar este proyecto de investigación y a la Vicerrectoría de Investigación y Postgrado de la Universidad de Panamá, por el análisis de la absorción atómica de los metales de las muestras de agua.

Al Instituto de Geociencias por brindarme el apoyo para ir a capacitarme a Austin, Texas; sobre tratamientos de imágenes de resistividad en 2D y 3D con el programa EarthImager2D y EarthImager3D de la AGI de Estados Unidos.

Al profesor Orlando Leone y a su equipo de analistas, conformados por los estudiantes de licenciatura en Química de la Facultad de Ciencias, Exactas y Tecnología de la Universidad de Panamá, por su tiempo y dedicación en los análisis de las muestras de agua.

Al Profesor Moisés Ortega, por sus conocimientos y experiencia como geofísico, que fue influyente la parte final de la tesis.

A mis amigos y compañeros, que de una manera desinteresada me apoyaron en lo emocional.

A la Profesora Laila Barragán, por brindarme su apoyo incondicional y presionarme para finalizar el trabajo de postgrado.

Y por último, pero no menos especial, mi agradecimiento al Magíster Pedro Salinas Serrano, quien me brindó la oportunidad para dirigir esta tesis, y se comportó como un segundo padre para mí.

INDICE GENERAL

	Pag
RESUMEN	1
SUMMARY	1
1 CAPITULO I	3
1 1 INTRODUCCION	4
1 2 OBJETIVOS	5
1 2 1 OBJETIVO GENERAL	5
1 2 2 OBJETIVOS ESPECIFICOS	5
1 3 ANTECEDENTES	5
1 4 METODOLOGIA GENERAL DEL DESARROLLO DEL PROYECTO	6
1 5 ZONA DE ESTUDIO	7
1 5 1 CLIMATOLOGIA	8
1 5 1 1 DATOS DE PLUVIOMETRIA	8
1 5 2 HIDROGRAFIA	9
1 5.3 GEOLOGIA LOCAL	10
1 5.3 1 CONCEPTOS DE GEOMORFOLOGIA Y DINAMICA COSTERA	11
1 5.3 2 GEOMORFOLOGIA DE PUNTA CHAME	12
1 5 4 ACTIVIDAD ECONOMICA	12
2 CAPITULO II	14
2 1 HIDROGEOLOGIA	15
2 1 1 TIPOS DE ACUIFEROS Y SU COMPORTAMIENTO	16
2 2 HIDROGEOLOGIA DE LAS CUENCAS SEDIMENTARIAS	17
2 3 PROSPECCIÓN GEOFISICA APLICADA A LA HIDROGEOLOGIA	17
2 3 1 GENERALIDADES	17
2 3 2 CLASIFICACIÓN DE METODOS	18
2 3 3 RESISTIVIDAD ELECTRICA	20
2 3 4 ASPECTOS TEÓRICOS DE RESISTIVIDAD	20
2.3 5 TOMOGRAFIA ELECTRICA	25
2 4 HIDROQUIMICA EN AGUAS SUBTERRANEAS	31

2 4 1	PARAMETROS FISICOS (TRAZADORES NATURALES)	31
2 4 1 1	TEMPERATURA	31
2 4 1 2	CONDUCTIVIDAD ELECTRICA	31
2 4 1.3	pH	31
2 4 1 4	TURBIEDAD O TURBIDEZ	31
2 4 2	COMPOSICIÓN QUIMICA DE LAS AGUAS SUBTERRANEAS	31
2 4 2 1	ALCALINIDAD TOTAL	31
2 4 2 2	ION CLORURO	32
2 4 2 3	ION SODIO	32
2 4 2 4	ION SULFATO	32
2 4 2 5	ION MAGNESIO	33
2 4 2 6	ION NITRATO	33
2 4 2 7	ION POTASIO	33
2 4 2 8	ION SILICE	33
2 4 2 9	ION CALCIO	34
2 4 3	DIAGRAMAS HIDROQUIMICOS	34
2 4.3 1	DIAGRAMAS DE PIPER	34
2 4 3 2	DIAGRAMAS DE SCHOELLER	35
2 4.3 3	DIAGRAMAS DE STIFF	36
2 4	INTRUSION SALINA	37
3	CAPITULO III	38
3 1	METODOLOGIA	39
3 1 1	RECOPILACIÓN Y SINTESIS BIBLIOGRAFICA	39
3 1 2	OPERACIONES DE CAMPO	40
3 1 2 1	METODOLOGIA DE INFORMACIÓN GEOLOGICA	40
3 1 2 2	METODOLOGIA DE CAMPO EN GEOFISICAS DE CAMPO	40
3 1 2 3	METODOLOGIA DE CAMPO EN HIDROQUIMICA	43
3 1 2 4	DETERMINACIÓN QUIMICA DE LABORATORIO	44
4	CAPITULO IV	45
4 1	RESULTADOS DE LA INFORMACIÓN GEOLOGICA	46
4 2	RESULTADOS GEOFISICOS	47

4.2.1	TOMOGRFIA ELCTRICA	47
4.2.1.1	ZONA 1 DE TOMOGRAFÍAS ELÉCTRICAS	48
4.2.1.2	ZONA 2 DE TOMOGRAFÍAS ELÉCTRICAS	51
4.2.1.3	ZONA 3 DE TOMOGRAFÍAS ELÉCTRICAS	53
4.2.1.4	ZONA 4 DE TOMOGRAFÍAS ELÉCTRICAS	55
4.3	RESULTADOS HIDROQUÍMICOS	57
4.4	MUESTREO AGUAS SUBTERRÁNEAS ANÁLISIS DE LABORATORIOS	58
4.4.1	DIAGRAMAS LOGARÍTMICOS VERTICALES SCHOELLER-BERKALOFF	60
4.4.2	DIAGRAMA DE PIPER	61
4.4.3	DIAGRAMAS DE STIFF	63
4.4.4	MAPAS DE ISOCONCENTRACIONES	64
4.4.4.1	MAPAS DE ISOCONCENTRACIÓN DE CONDUCTIVIDAD	64
4.4.4.2	MAPAS DE ISOCONCENTRACIÓN DE CLORURO	65
4.4.4.3	MAPAS DE ISOCONCENTRACIÓN DE NITRATO	66
5.	CAPÍTULO V	69
5.1	CONCLUSIONES	70
5.2	RECOMENDACIONES	71
	BIBLIOGRAFÍA	72
	ANEXOS	77
	ANEXO A: REPORTE DE ANÁLISIS QUÍMICO DE LAS MUESTRAS DE PUNTA CHAME	78
	ANEXO B: TOMOGRAFÍAS ELÉCTRICAS REALIZADAS EN PUNTA CHAME	97

INDICE DE FIGURAS

	Pág
Figura 1 1 Pozos fallidos del IDAAN a las afueras de Punta Chame	6
Figura 1 2 Division política del distrito de Chame Localizando a Punta Chame	7
Figura 1.3 Tipo de clima del area de Punta Chame	8
Figura 1 4 Índice de precipitaciones estandarizadas (SPI) para 12 meses periodo 1978 2010	8
Figura 1 5 Gráfica de precipitaciones media mensual de la estación de Chame del 2008 al 2010	9
Figura 1 6 Mapa de las diferentes cuencas existentes en Panamá	9
Figura 1 7 Geología local de Punta Chame	10
Figura 1 8 Formación Río Hato	11
Figura 1 9 Características de dinámicas costera de Punta Chame	12
Figura 1 10 Alquileres de cabanas y cuartos de hostel a la orilla de la playa	13
Figura 1 11 Botes pesqueros en la costas de las playas de Punta Chame y viveros de plantas	13
Figura 2 1 Acuíferos Subterráneos	16
Figura 2 2 Formación Río Hato suelo de origen sedimentario que encontramos en el área de estudio	17
Figura 2.3 Esquema simplificado de un sondeo eléctrico a medida que se aumenta la distancia AB aumenta la profundidad de investigación	19
Figura 2 4 Calicata eléctrica	19
Figura 2 5 Superficie cerrada sometida por una Intensidad de campo eléctrico y a una densidad de corriente eléctrica por los electrodos A y B	21
Figura 2 6 Intensidad de corriente I en el suelo en un punto A con un volumen semiesférico de radio r y espesor dr	22
Figura 2 7 Un electrodo de corriente sobre una superficie	24
Figura 2 8 Diferencia de Potencial entre los electrodos M y N	24
Figura 2 9 Esquema de Adquisición en tomografía 2D Tipo Wenner	26
Figura 2 10 Discretización 2D del Subsuelo	28
Figura 2 11 Modelos usando la inversión en 2D y 3D	28

Figura 2 12	Dispositivos que se emplean mas a menudo en tomografía eléctrica	28
Figura 2 13	Resistividades aparentes de un mismo modelo utilizando 3 dispositivos diferentes	29
Figura 2 14	Diagramas de Piper	34
Figura 2 15	Diagramas de Shcoeller	35
Figura 2 16	Diagramas de Stiff	38
Figura 2 17	Fenómeno de la Intrusion Salina	37
Figura 3 1	Pozo del MINSA en Punta Chame construido con los fondos del PRODEC	39
Figura 3 2	(izquierda) Ingeniero Geólogo Erick Tejeira y otros en exploracion geológica (derecha) Dr José Bienvenido de la Universidad de Almeria, Espana	40
Figura 3 3	Resistivimetro caja de conmutador y cables pasivos de la marca AGI	41
Figura 3 4	Adquisición de datos para realizar tomografías eléctricas en 2D y 3D con el Geofísico Moises Ortega y el Doctor Gabriel Parodi de la Universidad de Twente	42
Figura 3 5	Software utilizados para el procesamiento de datos para las tomografías electricas	42
Figura 3 6	Dr Daniel Martinez de la Universidad Nacional del Mar del Plata en gira en Punta Chame	43
Figura 3 7	Espectrofotómetro UV/visible Hach Dr 2800	44
Figura 3 8	Equipo de adsorción y emision atómica Shimatzu 6800 y análisis de resultados hidroquímicoscon el Dr Daniel Martinez de la Universidad Nacional del Mar del Plata, Lic Ricardo Canón y el Profesor Orlando Leone director del CITEN Universidad de Panamá	44
Figura 4 1	Formación Tocué justamente en la entrada de Punta Chame	46
Figura 4 2	Formacion Geológica Rio Hato (QR – Aha)	46
Figura 4.3	Ubicación espacial de la distribución de las Tomografias Electricas en Punta Chame	47
Figura 4 4	Zonificación de las Tomografias Eléctricas en Punta Chame	48

Figura 4 5	Zona 1 de las Tomografías Electricas en Punta Chame	48
Figura 4 6	Inversión de la Tomografía Eléctrica TE01	49
Figura 4 7	Adquisición de datos de la Tomografía Eléctrica TE01	49
Figura 4 8	Inversión de la Tomografía Electrica TE02	50
Figura 4 9	Adquisición de datos de la Tomografía Electrica TE02	50
Figura 4 10	Inversion de la Tomografía Eléctrica TE02	50
Figura 4 11	Zona 2 de las Tomografías Eléctricas en Punta Chame	51
Figura 4 12	Inversión de la Tomografía Electrica TE04 TE05 y TE06	51
Figura 4 13	Inversion de la Tomografía Electrica TE07	52
Figura 4 14	Inversión de la Tomografía Electrica TE08 y TE09	52
Figura 4 15	Inversión de la Tomografía Electrica TE10 y TE11	52
Figura 4 16	Zona 3 de las Tomografías Eléctricas en Punta Chame	53
Figura 4 17	Inversión de la Tomografía Electrica TE12	53
Figura 4 18	Area de adquisición de datos de la tomografía electrica TE12 se ve rocas aflorando	53
Figura 4 19	Inversion de la Tomografía Electrica TE13	54
Figura 4 20	Area de adquisición de datos de la tomografía electrica TE13	54
Figura 4 21	Inversion de la Tomografía Eléctrica TE14	54
Figura 4 22	Zona 4 de las Tomografías Electricas en Punta Chame	55
Figura 4 23	Inversión de la Tomografía Electrica TE15 TE16 y TE21	55
Figura 4 24	Inversion de la Tomografía Eléctrica TE17	56
Figura 4 25	Inversión de la Tomografía Electrica TE19 y TE20	56
Figura 4 26	Area de adquisición de datos de la tomografía electrica TE19 y TE20	56
Figura 4 27	Area de adquisición de datos de la tomografía eléctrica TE18	57
Figura 4 28	Ubicación Espacial de la distribución de los Pozos de Punta Chame	58
Figura 4 29	Diagrama de Schoeller de las muestras de aguas de los pozos de Punta Chame	60
Figura 4.30	Diagrama de Piper de las muestras de aguas de los pozos de Punta Chame	61
Figura 4 31	Diagrama de Piper de los pozos de la costa superior de la costa de Punta Chame	62

Figura 4 32	Diagrama de Piper de los pozos de la zona central de Punta Chame	62
Figura 4 33	Diagrama de Piper de los pozos de la zona inferior de Punta Chame	63
Figura 4 34	Distribucion espacial de las aguas subterránea de Punta Chame con la ayuda del diagrama de Stiff	63
Figura 4 35	Mapas de isoconcentración de conductividad	64
Figura 4 36	Mapas de isoconcentración de cloruro	65
Figura 4 37	Mapas de isoconcentración de nitrato	66
Figura 4 38	Mapas espacial de Pozos con alto riesgo de contaminación por intrusión salina	67
Figura 4 39	Mapas de isoresistividad a una profundidad de 3 0 m	68

INDICE DE TABLAS

	Pág
Tabla 1 1 Precipitaciones pluvial registrada en las estaciones meteorológicas de Chame del ano 2008 al 2010	9
Tabla 2 1 Resistividades de algunos materiales en Ω m	20
Tabla 2 2 Tabla caracteristica de los parámetros de investigación	31
Tabla 4 1 Ubicaciones de los perfiles de tomografia electrica del area de Punta Chame	47
Tabla 4 2 Ubicaciones de los pozos del area de Punta Chame	57
Tabla 4 3 Análisis de los cationes de las muestras de agua de los pozos de Punta Chame	59
Tabla 4 4 Análisis de los aniones de las muestras de agua de los pozos de Punta Chame	59
Tabla 4 6 Análisis de los fisicos de las muestras de agua de los pozos de Punta Chame	60

RESUMEN

Los primeros resultados la actividad de investigación se centró en la caracterización hidroquímica de las aguas de los pozos existentes de Punta Chame para el estudio de la intrusión salina. La salinidad primaria y la contaminación del acuífero libre de Punta Chame están vinculados a factores naturales como la actividad humana, el clima, los patrones naturales de drenaje, características topográficas, la estructura geológica, la distancia próxima al mar y la explotación indiscriminada de los recursos del agua subterránea. Los resultados obtenidos muestran un deterioro significativo de las aguas subterráneas. La grado de salinización debido a la mezcla de agua de mar en algunos pozos se debe en gran parte al aumento de la conductividad y la alta concentración de cloruro, los cuales son indicadores de intrusión salina debido a la sobre explotación del agua subterránea.

El enfoque basado en la tomografía de resistividad eléctrica se aplicó para obtener imágenes eléctricas de alta resolución que permiten identificar y delimitar la geometría de los límites lito estratigráficos por contrastes de resistividad. Las tomografías eléctricas representaron una herramienta óptima para una mejor reconstrucción de la geometría de las aguas frente a la intrusión marina y la cartografía de las zonas que se caracterizan por un alto nivel de salinización. Se realizaron 21 tomografías eléctricas a lo largo de ambas costas de Punta Chame con sistema de adquisición multielectrónico con configuración Wenner Alpha con una separación entre electrodos de 30 metros y dos tomografías de 60 metros de separación entre electrodos. La resistividad de las imágenes tomográficas en general han demostrado una disminución de la resistividad cuando se acerca a las costas y en algunas zonas de la costa han puesto de manifiesto la presencia de una capa superior de poco espesor con alta resistividad, valores que corresponde a arena bastante seca y a una pequeña capa de espesor saturado con agua fresca, más debajo de esta se presenta una capa con valores de resistividad baja indicando que el proceso de intrusión salina está presente afectando a los pozos cercano a la costa.

SUMMARY

The first results of the research activity focused on hydrochemical characterization of the waters of Punta Chame existing wells for the study of saline intrusion. The primary salinity and pollution free aquifer Punta Chame are linked to natural factors such as human activity, climate, natural drainage patterns, topography, geological structure, the distance next to the sea and the indiscriminate exploitation of groundwater resources. The results show a significant deterioration of groundwater. The degree of salinity due to the mixture of sea water in some wells is due in large part to increased conductivity and high concentration of chloride, which are indicators of saline intrusion due to over exploitation of groundwater.

The approach based on electrical resistivity tomography was applied to obtain high resolution electrical images to identify and define the geometry of the litho stratigraphic boundaries by resistivity contrasts. The electrical tomography represented an optimal tool for better reconstruction of the geometry of the waters off the saltwater intrusion and mapping the areas characterized by a high level of salinity. Twenty-one electrical tomography were conducted along power both coast Punta Chame multi

electrode acquisition system with Alpha Wenner configuration with an electrode spacing of 30 meters two electrical tomography of 60 meters apart electrodes. The resistivity of the tomographic images in general have shown a decrease in resistivity when approaching the coast and in some areas of the coast have revealed the presence of a thin top layer of high resistivity values corresponding to a rather dry sand and a small layer of water saturated thickness fresher below this layer provides a low resistivity values indicating that the salt intrusion process is present, affected the wells near the coast.

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN, METODOLOGÍA Y ZONA DE ESTUDIO

1.1 INTRODUCCIÓN

Las zonas costeras están sujetas a un rápido desarrollo turístico en Panamá y el conflicto de demanda de agua para el mismo, y es por eso que los recursos naturales, en especial las aguas subterráneas, se ven afectados por el fenómeno de intrusión salina.

Los fenómenos críticos que afectan principalmente a estas áreas son la erosión costera, las olas de mar o el aumento del nivel del mar, la contaminación de los acuíferos por sobre explotación y construcción de letrina que no guardan las normas de seguridad sanitaria. A lo largo de la costa hay muchos lugares donde la comunidad de Punta Chame tiene interés y esta se ven sometidas a una fuerte incidencia de las actividades humanas vinculadas principalmente al turismo. En Punta Chame las zonas costeras son de gran relevancia ambiental, económica, social y cultural. Por lo tanto, la implementación de acciones de protección y vigilancia adecuada para el acuífero libre costero es fundamental para su conservación y para asegurar el uso futuro de este recurso. Estas acciones tienen que basarse en una perspectiva ecosistémica, en donde intervengan todos los componentes sociales de la comunidad de Punta Chame, para la conservación de la integridad medio ambiente costero y su funcionamiento logrando de esta manera una planificación de la gestión sostenible del recurso agua. Según Koukadaki et al (2012), esta planificación y gestión de los recursos naturales debe desarrollarse a través de un proceso dinámico que tiene que fijar como objetivo la promoción del bienestar económico y social de las zonas costeras.

Desafortunadamente las zonas costeras están a menudo expuestas a las contaminaciones por la intrusión de agua de mar, y la vulnerabilidad a la salinización (casos más comunes de estos acuíferos). La extensión de la intrusión de agua salina en la zona costera está influenciada por la naturaleza de las formaciones geológicas presentes, gradiente hidráulico, la velocidad de retirada de las aguas subterráneas y su recarga Freeze & Cherry (1979). Muchos estudios se han centrado en el problema de la infiltración de agua de mar, y la estimación de la intrusión de sal se pueden hacer con los métodos químicos clásicos de medición de los parámetros que mejor resaltar la contaminación salina como la conductividad eléctrica, la concentración de cloruro Demirel (2004), Duquet et al (2007), Frohlich et al (2008), Petalas et al (2006). En el mundo se han realizado muchas investigaciones utilizando las tomografía eléctricas para caracterizar las diferentes formaciones hidrogeológicas de acuíferos costeros, como una alternativa a los métodos tradicionales de la geofísica aplicada (tomografía eléctrica), en particular, para evaluar la intrusión de agua de mar Balia et al (2003), Bauer et al (2006), Ebraheem et al (2005).

Este estudio trata de determinar y evaluar las características de las aguas subterráneas, describir el origen y distribución espacial de las aguas subterráneas salinas en la zona costera de Punta Chame, mediante la aplicación de técnicas geofísicas e hidroquímicas.

Con las aplicaciones de las técnicas geofísicas se clasificaron cuatro (4) zonas de estudio. En la zona 1 y zona 2 se presentan indicios de contaminación por intrusión salina; la Zona 3, en unos de sus sectores, presenta una atenuación de la cuña salina, debido a la presencia de manglares; y en la Zona 4, es la zona que presenta mayor providencia para perforar nuevos pozos.

Tres grupos principales de calidad de agua se producen en el area de estudio es decir las bicarbonatadas cálcicas las cloruradas y las aguas de mezcla El principal proceso de control de la química del agua subterránea es el intercambio de calcio y de sodio entre la matriz del acuífero y el agua de intrusión salina La intrusión de agua de mar en el sistema acuífero costero se produce como resultado de exceso de bombeo de agua de mar La aplicación de varias técnicas hidroquímicas (diagramas de Piper Schoeller y Stiff mapas de isoconcentraciones de Cloruro de conductividad y nitrato)

La aplicación de las técnicas geofísica e hidroquímicas logró conducir a una mejor explicación del origen de las aguas subterráneas y el fenómeno de intrusión salina

1 2 OBJETIVOS

1 2 1 OBJETIVO GENERAL

Presentar un análisis de la evolución de la intrusión marina en la zona costera de punta chame

1 2 2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

Aplicar el metodo electroresistivo para delimitar la intrusión salina utilizando modelos de Tomografía Electrica modelandolo en 2D

Caracterizar las aguas subterráneas de la zona de estudio aplicando metodos hidrogeoquímicos

Confeccionar mapas de isoconcentraciones de cloruro y contaminantes como trazadores naturales para determinar la dirección preferencial de estos

1 3 ANTECEDENTES

El desabastecimiento de agua esta afectando gravemente las condiciones de vida de miles de panamenos que habitan en areas costera del pacifico panameno Punta Chame no escapa de este problema La capacidad de las fuentes de aguas y la disponibilidad de agua en Punta Chame está siendo afectadas directamente por el vertiginoso incremento de la demanda de este vital liquido como producto del crecimiento poblacional la construcción vertiginosa de varios complejos turísticos las descargas de agua servida no tratada por falta de un sistema de alcantarillado de depuración de las agua servida, eventos climáticos asociados a huracanes al fenomeno de El Nino y la grave consecuencias de sequias estacionales que se extiende los periodos de déficit de agua más allá de seis meses al año

Los problemas de agua en Chame datan de más de una década, en el 2007 se presenta los primeros problemas después de haberse construido la planta potabilizadora de Chame donde los residentes de Chame se quejan ante al director Nacional del Instituto de Acueductos y Alcantarillados Nacionales (IDAN) Juan José Amado III de que las aguas en sus residencias están saliendo turbias con sedimentos y salobres

En el 2012 la zona costera de Panama Oeste presenta un serio problema por el cambio climático lo que provoca que los recursos hídricos se salinicen situación que motiva a buscar nuevas fuentes de agua potable para el consumo de la población de Punta Chame La ANAM explicó que desde hace años poblaciones de Punta Chame vienen sufriendo el problema de tener que

tomar agua salobre, por lo que están en la búsqueda de otra fuente en el cerro Chame, a unos diecisiete kilómetros de Punta Chame.

Otros de los factores que han influenciado en la salinización de las fuentes de aguas subterráneas o de los acuíferos son los cambios climáticos los cuales han aumentado la salinidad de las mismas.

El acuífero costero de Punta Chame es susceptible a contaminación por el tipo de suelos arenosos característicos de esta formación geológica existente en el área; en la actualidad se desconoce las características hidráulicas, hidroquímica e hidrogeológicas de este acuífero. Según datos recabados por el IDAAN, de la sección de fuentes subterránea se han encontrado pozos fallidos en el área de estudio, por ser salobres sin saber las razones de este problema, ya que la unidad no cuenta con un equipo de investigadores que se dediquen a este problema. La figura 1.1, muestra los dos pozos construidos para abastecer de agua a la población de Punta Chame, los cuales al cabo de tres meses de puesto a funcionar se salinizaron.



Figura 1.1 Pozos fallidos del IDAAN a las afueras de Punta Chame.

Esta fue una de las razones por la cual se pensó en la necesidad realizar el estudio hidrogeofísico del área, ya que no existen estudios previos publicados; de aquí que este estudio pueda ser utilizado como análisis preliminar de un posible problema de contaminación por desplazamiento de la cuña salina hacia el litoral (intrusión salina) causada por bombeos descontrolados de los pozos cercanos a las costas.

1.4 METODOLOGÍA GENERAL DEL DESARROLLO DEL PROYECTO

Esta investigación está estructurada de la siguiente manera:

El Capítulo I, la parte introductoria del documento que explica el desarrollo del trabajo, presenta antecedentes del proyecto, características generales de la zona de estudio como los objetivos generales y específicos del proyecto.

El Capítulo II corresponde al marco teórico de las metodologías utilizadas durante el desarrollo del proyecto, sobresaliendo la hidrogeología, geofísica aplicada, hidroquímica.

El Capítulo III presenta la geología regional y local de la zona de estudio

El Capítulo IV presenta los análisis de los resultados obtenidos del proyecto de los tres métodos de estudio utilizados; el geofísico (método electroresistivo) realizando 21 tomografías eléctricas; y la hidroquímica (análisis fisicoquímicos) adquiriendo 18 muestras de aguas subterránea, como una herramienta de comprobación.

El capítulo V atañe a las conclusiones y recomendaciones que se hace con respecto a la zona de explotación de agua subterránea; y el Capítulo VI incumbe a las literaturas citadas.

1.5 ZONA DE ESTUDIO

El corregimiento de Punta Chame se encuentra localizado en el Distrito de Chame de la Provincia de Panamá, República de Panamá; georeferenciada aproximadamente a los $8^{\circ}39'0''$ de latitud Norte y $79^{\circ}42'0''$ de longitud Este (figura 1.2).

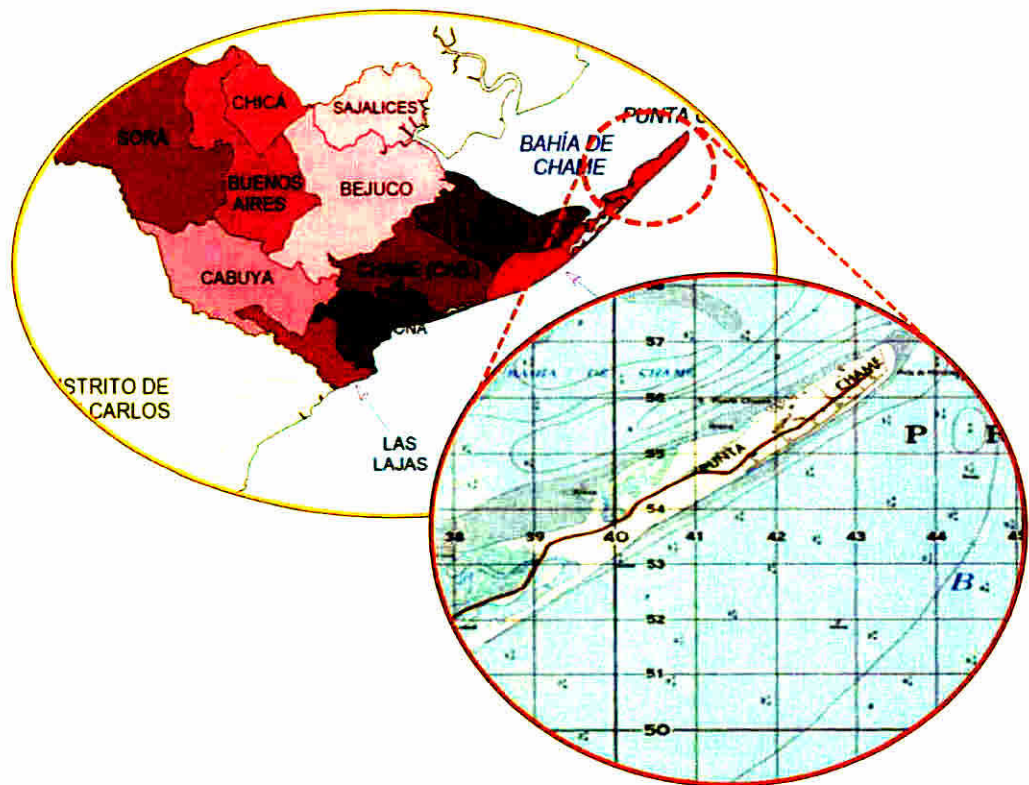


Figura 1.2 División política del distrito de Chame. Localizando a Punta Chame. Tomado de (Censo & Contraloría General de la República de Panamá, 2010) (Guardia & MOP)

Colindando al Noreste con el Golfo de Chame, al Sur con el Golfo de Panamá y al Oeste con el corregimiento de El Libano y Chame cabecera; en conclusión es una península estrecha y larga, con océanos en ambos lados y con playas de arena blanca (zona totalmente costera).

1.5.1 CLIMATOLOGÍA

Su superficie territorial de 17,0 km² con una población de 443 habitantes, con un clima tropical de sabana (Aw), tipo de clima que caracteriza a la mayor parte de la República (ver figura 1.3).

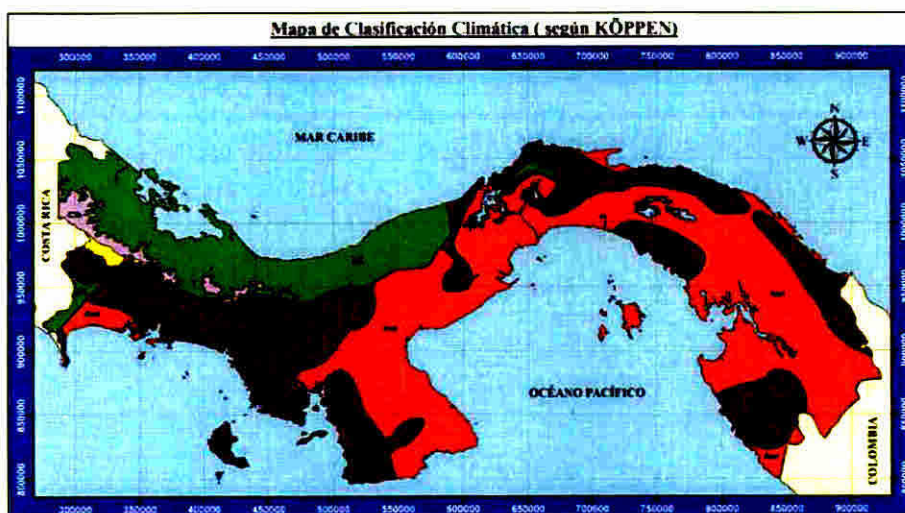


Figura 1.3 Tipo de clima del área de Punta Chame. Tomado de (ETESA, 2009)

Cuenta con una precipitación pluvial anual que van de 60 mm a 2 000 mm, con precipitaciones bajas en la estación seca y precipitaciones altas en la estación lluviosa, además su temperatura oscila entre 26° C y 28° C, ligeramente húmedo como se ilustra en la figura 1.4 (información de los Censo Nacionales 2010).

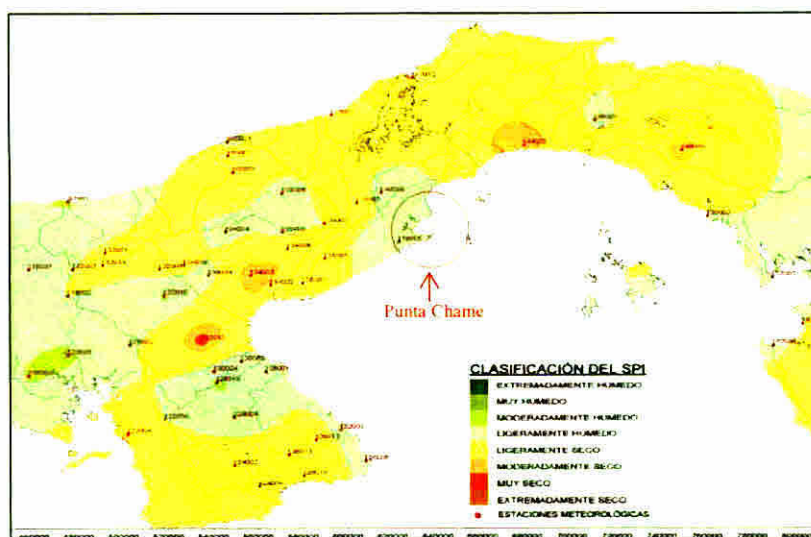


Figura 1.4 Índice de precipitaciones estandarizadas (SPI) para 12 meses, periodo: 1978-2010. Tomado de (ETESA, 2009)

1.5.1.1 DATOS DE PLUVIOMETRÍA

En la tabla 1.1 presentaremos datos de las precipitaciones pluvial registrada en las estación meteorológica 138-005 de Chame del año 2008 al 2010, el cual detallamos en la figura 1.5.

Tabla 1.1 Precipitaciones pluvial registrada en las estaciones meteorológicas de Chame del año 2008 al 2010.

Fuente: (INEC, 2010)

	Ene.	Feb.	Mar.	Abril	Mayo	Junio	Julio	Ago.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.
Precipitación (2008) en mm	0,0	11,9	0,0	0,0	213,7	160,5	200,1	230,8	80,2	193,7	231,0	48,5
Precipitación (2009) en mm	21,1	0,0	0,0	0,0	185,3	261,4	176,5	197,5	197,7	152,9	292,8	0,0
Precipitación (2010) en mm	0,0	0,0	0,0	189,1	92,1	363,5	332,4	198,5	220,5	218,0	226,5	120,7

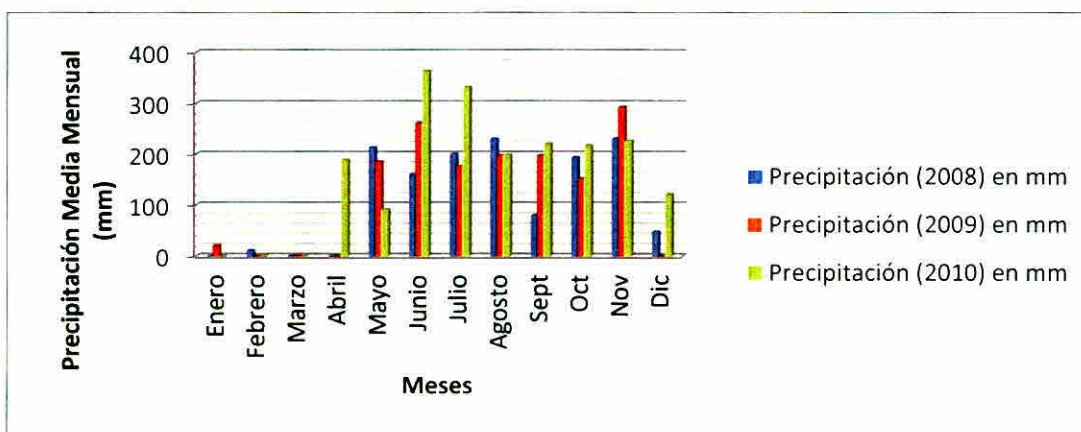


Figura 1.5 Gráfica de precipitaciones media mensual de la estación de Chame del 2008 al 2010.

Tomado de (INEC, 2010)

1.5.2 HIDROGRAFÍA

Punta Chame pertenece a la cuenca hidrográfica 138 (Ríos entre el Antón y el Caimito), figura 1.6 con una extensión de 1476,0 km². Los humedales mantiene influencia mareal, la escorrentía superficial según el mapa de isoescorrentía de ETESA, oscilan entre 0 a 250 mm.



Figura 1.6 Mapa de las diferentes cuencas existentes en Panamá. Tomado de (ETESA, 2009)

1.5.3 GEOLOGÍA LOCAL

En el corregimiento de Chame predominan dos tipos de formaciones geológicas, estas son la formación geológica de Río Hato y la formación geológica de Tucué (figura 1.7).

El área donde se desarrolló el proyecto de Punta Chame está representada, en su mayoría, por la formación Río Hato (**QR-AHA**), compuesta por conglomerados, areniscas, lutitas, tobas, areniscas no consolidadas, pómez.

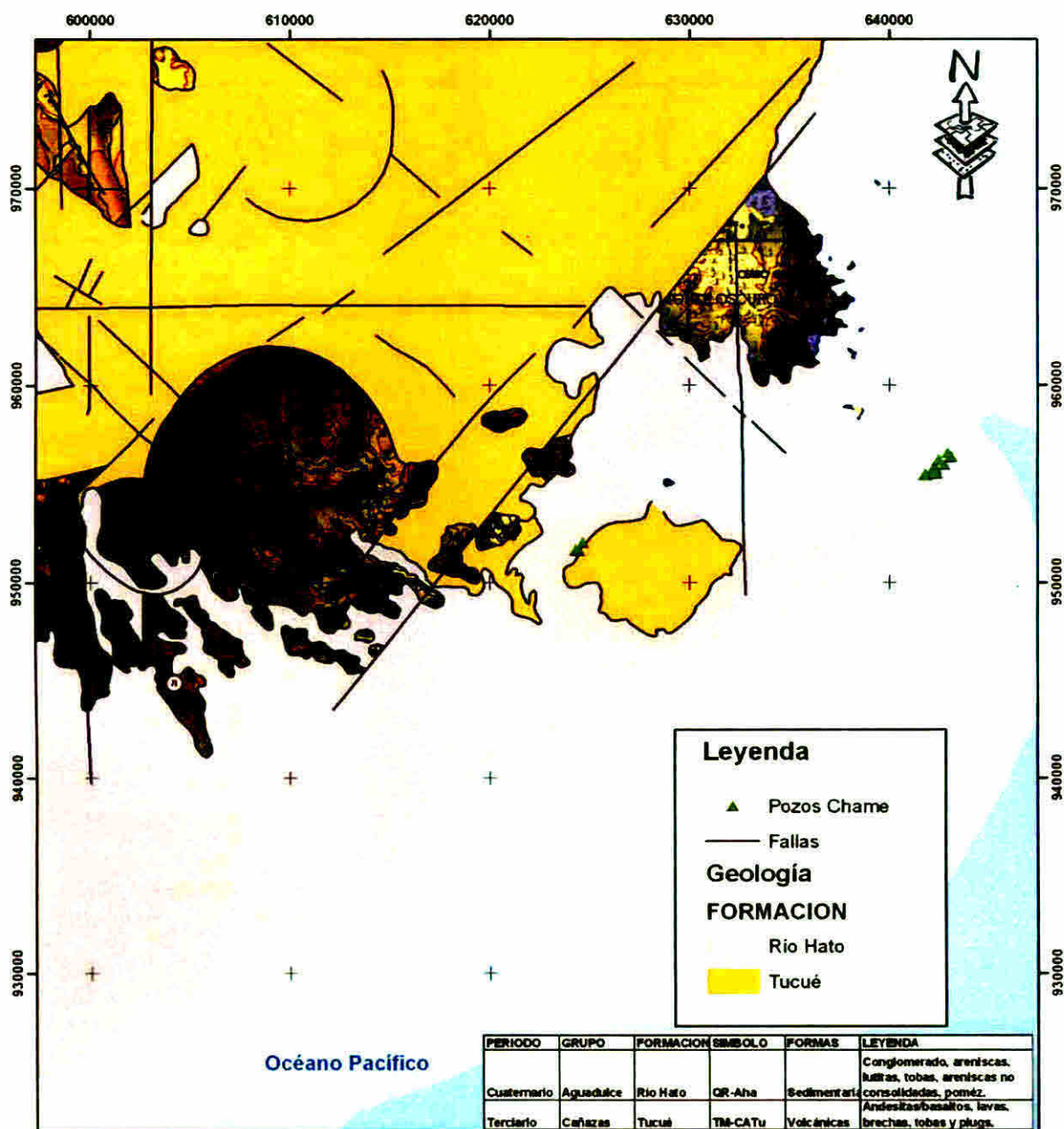


Figura 1.7 Geología local de Punta Chame.

En la figura 1.8 se observa la formación y el tipo de con que cuenta el sector de Punta Chame.



Figura 1.8 Formación Río Hato.

Mientras que la formación geológica con menor presencia es la de Tocué (TM – CATu), compuesta por andesitas, basaltos, lavas, brechas, tobas y "plugs".

1.5.3.1 CONCEPTOS DE GEOMORFOLOGÍA Y DINÁMICA COSTERA.

Las playas sufren cambios topobatiométricos bajo la acción del oleaje, corrientes y vientos, debido a la interacción entre el ambiente terrestre y el ambiente marino. El tipo de interacción predominante en la zona estudio geomorfológicamente, es un cordón litoral. Los elementos que sobresalen de la geomorfología de esta zona, atendiendo a su variación longitudinal, son los siguientes:

- **Berma:** Esta representa el sector paralelo a la playa o playa posterior originada por el depósito de material clástico producto de la acción de las olas, en ocasiones suelen existir varias bermas que corresponde a diferentes estaciones del año, llamadas bermas estacionales. En algunas oportunidades, la berma tiene el aspecto de una lomada más o menos paralela a la línea de costa, caso en el que suele denominársele cresta de playa.
- **Escarpe de Playa:** Son aquella pendiente casi vertical a lo largo de la playa, causada por la erosión debido a las olas formadas por un temporal. Su altura puede variar desde unos pocos centímetros a un metro o más, dependiendo del tipo de ondas que actúe en la playa y en el tipo de material que componen la playa.
- **Dunas:** Se trata de una acumulación de arena formada por los vientos dominantes de levante al chocar frontalmente con el final de la ensenada. Suelen tener características móviles en la dirección del viento, en sus valles está cubierta por vegetación y sedimentos arrastrados por el viento. Pueden ser de cuatro niveles que son: embrionaria, primaria, secundaria y terciaria.
- **Albufera:** Extensión de agua salada o semisalada aislada del mar por un cordón arenoso o flecha.

1.5.3.2 GEOMORFOLOGÍA DE PUNTA CHAME

La llanura costera de Punta Chame corresponde a una larga extensión de un cordón litoral que se formó frente a la costa de la desembocadura de río Chame, este cordón litoral, es una barrera de tierra o arena que se originó de la sedimentación marina de los materiales sólidos aportados por los ríos existente en el área; el mar los transportó y los acumulo en lugares donde existían las condiciones favorables, finalmente termino emergiendo a la superficie del mar y es lo que hoy conocemos como Punta Chame.

En la entrada de Punta Chame podemos observar una extensión de cordón arenoso que forma una Albufera, tal como se aprecia en la figura 1.9. Las llanuras de la costa de Punta Chame se pueden apreciar las bermas estacionales que siguen trayectorias paralelas a la playa y las dunas embrionarias pequeñas formadas cerca de las costas.

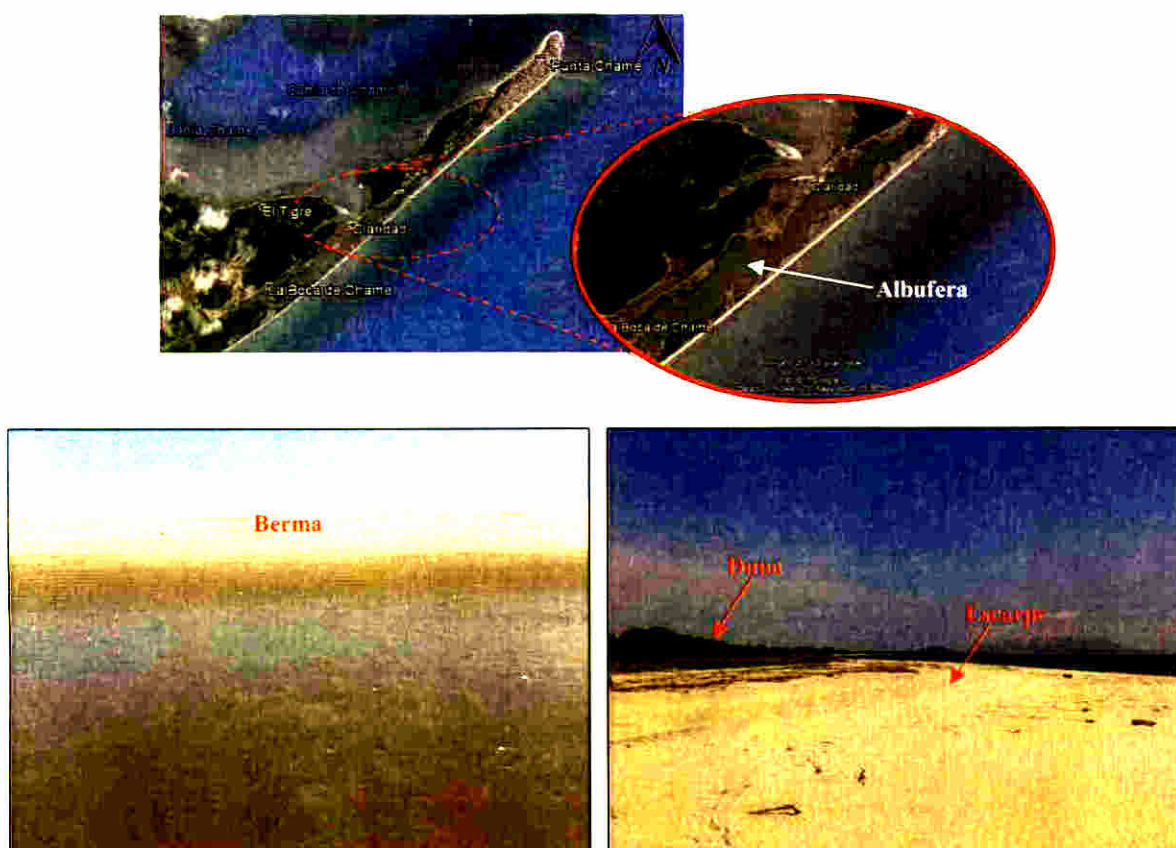


Figura 1.9 Características de dinámicas costera de Punta Chame.

1.5.4 ACTIVIDAD ECONÓMICA

El sector de Punta Chame se encamina a despegar como polo turístico apoyado en los recursos naturales que posee, además del aeropuerto doméstico que sirve para viajes cortos desde la ciudad capital. Para acelerar el turismo local o internacional en esta área se tienen aspectos de interés, como su posición geográfica, su variada flora y fauna, la migración de aves, el

anidamiento de tortugas marinas, el deporte extremo, seguridad, tranquilidad, y la cultura homogénea de sus residentes que tienen costumbres que despiertan la admiración de los turistas.

La región de Chame contempla un proyecto de manglares, que ya empezó con un vivero de mangle rojo, que es la vegetación típica de la costa y la cual ha sido aprovechada sin mayor control por los moradores (QUEZADA, 2011).

Otra entrada económica potencial en el sector de Punta Chame es el de hotelería tipo resort, que se están desarrollando en el área fuertemente, la figura 1.11 muestra uno de los Hostal y alquileres de cabañas cerca de la costa. Estos han llamado la atención de miles de turistas nacionales e internacionales por el tipo de playas y clima que son muy llamativos y atractivos.



Figura 1.11 Alquileres de cabañas y cuartos de hostal a la orilla de la playa.

Mientras que localmente se desarrolla la pesca de peces y camarones, siendo una fuente fuerte en las exportaciones de peces y camarones a otros corregimientos y distritos del país, además de viveros de plantas para las ventas de matas como orquídeas, veraneras, entre otras, figura 1.12.



Figura 1.12 Botes pesqueros en la costas de las playas de Punta Chame y viveros de plantas.

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2 1 HIDROGEOLOGIA

La hidrogeología o hidrología subterránea es una ciencia de carácter multidisciplinar donde se combinan los conocimientos de la Ciencias de la Tierra (geología geofísica e hidráulica) y química con el estudio del flujo en medio poroso y la gestión de recursos naturales. La hidrogeología es una Ciencia de la Tierra indicando que los aspectos de calidad y cantidad son cuantificables y pueden estudiarse de modo formal. Esta ciencia tiene una componente tecnológica importante que incluye la localización óptima del recurso hídrico, el diseño, la construcción y el mantenimiento de captaciones de agua en el terreno, sistemas de recarga, drenajes, etc.

Podemos decir que la hidrogeología es el estudio del origen y la formación de las aguas subterráneas, atendiendo su formas de yacimiento, obtención, cuantificación, difusión, movimiento, régimen, reserva, estado, interacción, calidad, propiedades y mantenimiento del mismo, por procesos científicos (geológicos, físicos y químicos) y tecnológicos, así como las condiciones que determinan las medidas de su aprovechamiento, regulación y evacuación (Canales Escobar, Gómez Miranda & Funes 2009). Es importante matizar que solo desde el conocimiento de los distintos aspectos hidrogeológicos se pueden llegar a decisiones informales y fundamentadas sobre la evaluación y la explotación de los recursos hídricos existentes.

El agua subterránea se encuentra normalmente entre los poros de materiales geológicos permeables, constituyendo formaciones denominadas acuíferos que se caracterizan por sus distintas formaciones hidrogeológicas. Así, definimos acuífero como una formación capaz de almacenar, filtrar y transmitir agua en cantidades significativas (FCIHS 2009).

Podemos mencionar algunas de las características más sobresalientes de las aguas subterráneas:

- Notable almacenamiento asociado que hace que su cantidad y calidad estén menos afectadas por la variabilidad de la pluviometría y sean reservas de gran valor estratégico en sequías y situaciones de emergencia.
- Regularidad de su composición química, radioquímica, biológica.
- Mayor protección temporal frente a procesos contaminantes accidentales.
- Frecuente disponibilidad en el lugar o cerca de donde se produce la demanda, con inversiones moderadas.

El agua subterránea es una parte integral del ciclo del agua y representa una fracción importante del agua presente en cada momento en los continentes, con un volumen mucho más importante que el del agua retenida en lagos o circulante, aunque menor que el de los glaciares, cerca del 30.1 % del agua dulce del mundo es agua subterránea. El agua del subsuelo es un recurso importante pero de difícil de gestionar por su sensibilidad a la contaminación y a la sobreexplotación.

El agua del suelo se renueva en general por procesos activos de recarga desde la superficie. La renovación se produce lentamente cuando la comparamos con la de los depósitos superficiales como los lagos y los cursos de agua. El tiempo de residencia (el periodo necesario para renovar por completo un depósito a su tasa de renovación normal) es muy largo. En algunos casos la renovación está interrumpida, por la impermeabilidad de las formaciones geológicas superiores (acuitardos) o por circunstancias climáticas.

2.1.1 TIPOS DE ACUÍFEROS Y SU COMPORTAMIENTO

Los acuíferos, según sus características hidráulicas o según su presión hidrostática, se clasifican en cuatro tipos:

- **Acuíferos libres:** El agua se encuentra rellenando los poros o fisuras por gravedad. La superficie hasta donde llega el agua se denomina superficie freática; cuando esta superficie es cortada por un pozo se habla del nivel freático, en ese punto (figura 2.1). El espesor saturado en los acuíferos libres es menor e igual que el espesor del estrato o formación geológica, correspondiente.
- **Acuíferos cautivos o confinados:** Son aquellos que se encuentran aislados en el subsuelo, cubierto de materiales impermeables por todos sus lados; el agua se encuentra a presión, de modo que si extraemos agua de él, ningún poro se vacía, sólo disminuye la presión del agua y en menor medida la de la matriz sólida. Al disminuir la presión del agua, que colaboraba con la matriz sólida en la sustentación de todos los materiales suprayacentes, pueden llegar a producirse asentamientos y subsidencia del terreno.
- **Acuíferos semi-confinados:** Son acuíferos a presión, pero, algunas de las capas confinantes son semipermeables. En la figura 2.1, vemos un acuífero libre y un semi-confinado separados por un acuitardo. Se aprecia que el nivel de agua en el libre es más alto que en la perforación que corta el acuífero profundo (la entubación de esta perforación sólo estaría ranurada en el acuífero inferior). Por tanto, aunque la permeabilidad del acuitardo sea muy baja, se producirá un flujo de aguas a través del mismo hacia abajo.
- **Acuíferos Colgados:** Son los que se producen ocasionalmente cuando, por efecto de una fuerte recarga (época de lluvia), asciende el nivel freático quedando retenida una porción de agua por un nivel inferior impermeable.

Los acuíferos son sistemas complejos. Para poder tener conocimiento exhaustivo o comprehensivo de un sistema acuífero es necesario tener una visión multidisciplinar. La hidrogeología moderna se complementa de un conjunto muy importante de ciencias físicas, química, hidrología, entre otras; implicando el punto de vista social, económico y/o ambiental.



Figura 2.1 Acuíferos subterráneos. Modificado de (Ponce, 2006)

2.2 HIDROGEOLOGÍA DE LAS CUENCAS SEDIMENTARIAS

Las cuencas de tipo sedimentaria incluye a todas aquellas formaciones geológicas de origen detrítico o carbonatado, con cuerpos intrusivos tipos vulcanosedimentario o diques hipoabisales interestratificados afectados por litificación, consolidación o enfriamiento. Dentro de esta cuenca pueden distinguirse aquellas que son funcionales o activas, en las que actualmente se sigue registrando la subsidencia o compactación del sedimento, de aquellas denominaciones pasivas, no funcionales o emergidas, donde en muchas zonas de la tierra se concentra gran parte de la actividad humana, el cual las hace interesante por su potencialidad, cantidad y calidad del recurso hídrico (Sánchez J. , 2009). La figura 2.2 se presenta la formación Río Hato que corresponde al cuaternario reciente cuya litología presenta conglomerado y arena de diferentes granulometrías.



Figura 2.2 Formación Río Hato, suelo de origen sedimentario que encontramos en el área de estudio.

Las rocas sedimentarias están compuestas por fragmentos que resultan de la alteración y la erosión de rocas preexistentes, ellas se encuentran clasificadas de acuerdo a los tamaños de los clastos presentes y a la composición del material. El análisis de las gravas y los conglomerados puede llevarse a cabo en el campo y puede revelar la proveniencia del material y cómo fue transportado, del mismo modo, las arenas y areniscas también pueden ser descritas en el campo para revelar la composición de los granos individuales y las relaciones que existen entre unos y otros. Los sedimentos más finos, el limo y la arcilla, sólo pueden ser completamente analizados usando el microscopio de difractor de rayos X. Las proporciones de los diferentes tamaños de los clastos y las texturas de los sedimentos terrígenos clásticos junto con las rocas sedimentarias pueden proporcionar información sobre la historia del transporte del material y el ambiente de depósito (Ayala, 2010).

2.3 PROSPECCIÓN GEOFÍSICA APLICADA A LA HIDROGEOLOGÍA

2.3.1 GENERALIDADES

Gran parte de las investigaciones hidrogeológicas en zonas costeras se realizan, tradicionalmente, sondeos mecánicos para conocer de una manera directa e indirecta, con observaciones

geológicas, las características geomorfológicas del área de estudio; con el cual se puede llegar a tener éxito en la perforación de agua subterránea como en calidad de producto. La profundidad de investigación de dichos sondeos está sujeta a como está constituido el subsuelo y la extensión de los perfiles de investigación, que pueden permitir que el proceso de interpretación en una zona puntual, con ello una perforación puede ser exitosa o fallida. Actualmente, las técnicas de prospección geofísicas que permiten estudiar de una manera indirecta, no invasiva, desde superficie logrando amplias secciones del subsuelo de forma rápida, en donde se logra una mejor optimización en el proceso de investigación.

La Geofísica se puede considerar la ciencia que estudia la física de la tierra, sus propiedades medibles, a través de métodos pasivos o activos. Como ocurre en otras ciencias, la Geofísica la podemos dividir en dos partes Geofísica Pura y Geofísica aplicada. La primera mencionada se ocupa del estudio de la gravedad, magnetismo, electricidad y sismología terrestre, pero también comprende los estudios de vulcanología, geodinámica, climatología, oceanografía y otras ciencias relacionadas con la física de la tierra (PARRAGUIRRE, 2002). Mientras que La Geofísica Aplicada orienta su estudio a investigaciones con finalidades prácticas, más o menos próxima, y es una derivación de la Geofísica, sin que puedan establecerse límites precisos entre ambas.

La “Prospección Geofísica” es una rama de la Geofísica Aplicada, siendo el conjunto de técnicas físicas y matemáticas, aplicadas a la exploración y reconocimiento del subsuelo con fines prácticos, se definiéndose también como la ciencia y técnica que, a partir de fenómenos físicos, naturales o provocados, trata de conocer la distribución de los materiales en el subsuelo y sus propiedades. A diferencia de la prospección geofísica, los sondeos mecánicos brindan información precisa, ya que son métodos directos, pero limitada a la zona donde se encuentra la perforación, y en cuanto a los costos son muy elevados. La prospección geofísica ofrece una alternativa más económica y permite su realización en muchos sitios, ahorrando tiempo y espacio (Santos, 2012).

La ventaja que presenta la prospección geofísica, antes de una perforación es que se logra tener un conocimiento previo de las características litológica de la zona de estudio, con el cual se puede planificar de una mejor manera, y eficiente, los sondeos mecánicos, minimizando los riesgos de sondeos mecánicos fallidos; logrando de una manera más óptima, resultados favorables. Teniendo en cuenta los resultados de las diferentes variables medibles, según el método de prospección geofísica aplicado, se pueden determinar correlaciones tanto geológicas como hidrogeológicas.

2.3.2 CLASIFICACIÓN DE MÉTODOS

Para la utilización de los métodos nos basamos en su clasificación según el fenómeno empleado, y si es natural o creado artificialmente (inducidos). Los inducidos tienen la ventaja, ya que se puede controlar su origen en el tiempo y en el espacio, lo que en general permite un tratamiento matemático e interpretación más precisa.

Podemos mencionar algunos métodos que se utilizan dentro de la geofísica aplicada:

Magnético: (*Natural*)

Gravimétrico: (*Natural*)

Eléctrico: Corriente telúricas (*Natural*)

Potencial espontáneo (*Natural*)
 Líneas equipotenciales (*Inducido*)
 Resistivo (*Inducido*)
 Caída de Potencial P.D.R (*Inducido*)
 Electromagnético (*Inducido*)
 Sísmico: Terremotos (*Natural*)
 Refracción (*Inducido*)
 Reflexión (*Inducido*)
 Radiactivos (*Natural e Inducido*)
 Térmicos (*Natural*)

Los registros de sondeos eléctricos, por su peculiaridad y variedad, deben tratarse como un grupo aparte, en el que puede realizarse una clasificación análoga; pero sólo nos enfocaremos con el método electro resistivo. La característica física es que utiliza la resistividad o resistencia específica de los diferentes terrenos, basándose en las propiedades de contorno, homogeneidad e isotropía del terreno. En superficie se efectúan una serie de medidas, que permiten obtener resistividades “aparentes”, en función a la línea de emisión u otro parámetro lineal. Las parejas de valores se representan gráficamente, curva que recibe el nombre de sondeo eléctrico vertical (SEV) y se interpreta según varios métodos, figura 2.3 y figura 2.4.

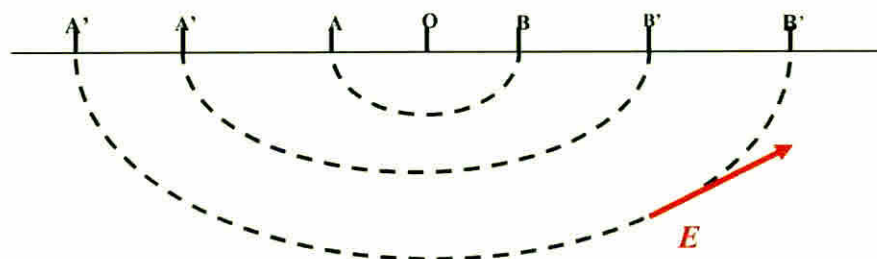


Figura 2.3 Esquema simplificado de un sondeo eléctrico, a medida que se aumenta la distancia AB, aumenta la profundidad de investigación. *Modificado de* (Roman, 2009)

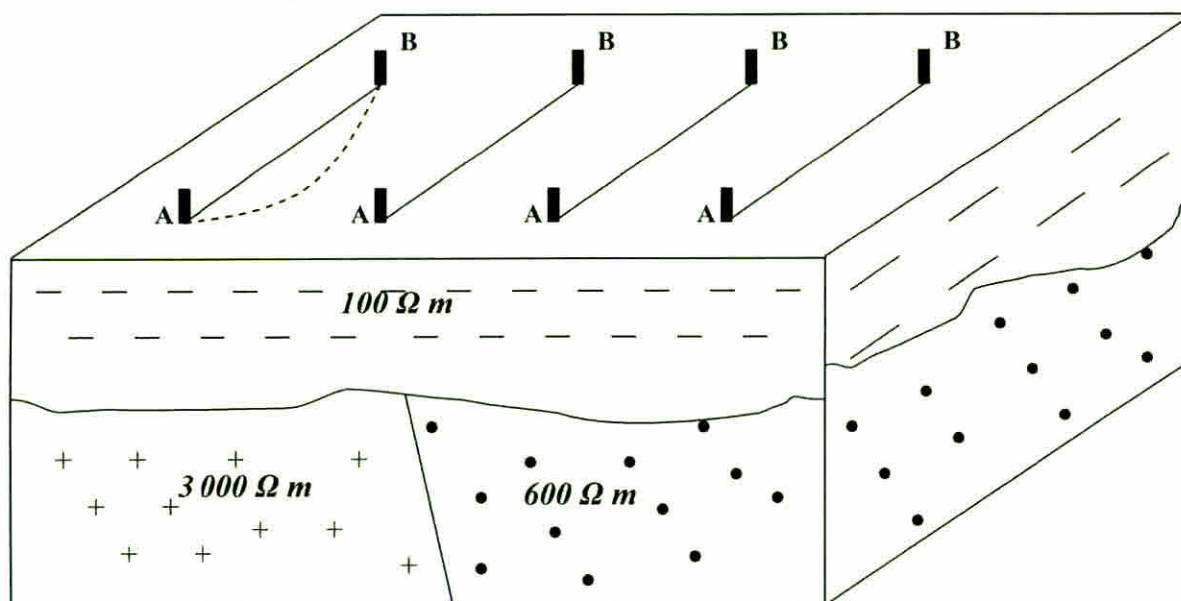


Figura 2.4 Calicata eléctrica. *Modificado de* (Roman, 2009)

2.3.3 RESISTIVIDAD ELÉCTRICA

Si en un terreno inducimos una corriente eléctrica, ésta se propaga de forma tal que podemos asignar al terreno una resistencia, una capacidad y una inductancia. Si la corriente eléctrica es continua tendremos la resistencia como parámetro único (Custodio & Llamas, 1983). La unidad de la resistividad o resistencia específica, es el ohm-metro.

Tomando en cuenta que sólo son conductores los materiales metálicos y algunos materiales que contienen sales y que la conductividad es el inverso de la resistividad, el terreno, por lo tanto, sería en términos general un material con resistividad muy elevada. Pero en todos los materiales de terreno existen poros saturados o no de agua, aunque siempre con una cierta humedad. El agua, por la presencia de sales disueltas, en proporción que depende de la temperatura, actúa como un conductor, cuya resistividad es menor a $1,0 \Omega \text{ m}$ (agua del mar) y las aguas salobres cuya resistividad oscila de $1,0 \Omega \text{ m}$ a $10 \Omega \text{ m}$, según algunos autores (ver tabla 2.1).

Se comprende que no es posible clasificar los terrenos por la resistividad, ya que esta característica eléctrica está ligada a la porosidad, al contenido de agua y su resistividad. Sin embargo, si existe una cierta relación indicativa y lo que es más interesante, conocido el terreno y su situación respecto al nivel freático, podemos deducir su porosidad de forma aproximada y cualitativa, y del mismo modo la calidad del agua que rellena los poros. A efectos hidrogeológicos, una porosidad baja se manifiesta por resistividad elevada. Si la roca se encuentra sobre el nivel freático, o no contiene agua, la resistividad será elevada. Si la resistividad es muy baja, el agua almacenada tendrá un elevado contenido de sales.

A efectos indicativos, en la tabla 2.1 se da un resumen de los valores de la resistividad de diferentes materiales:

Tabla 2.1 Resistividades de algunos materiales en $\Omega \text{ m}$. *Fuente:* (Lausanne, 2009)

Aguas Subterráneas en granito y roca hipogénica	20 – 100
Aguas subterráneas en caliza y acarrees	20 – 50
Aguas salobres	1 – 10
Aguas potables superficiales	20 – 300
Agua del mar	Menor de 1,0
Agua destilada	Mayor de 500
Arcillas y margas	10 – 100
Calizas y areniscas	50 – 3 000
Pizarras	50 – 300
Rocas hipogénicas y metamórficas	100 – 10 000
Gravas	100 – 10 000
Arenas	130 – 1 000
Limos	30 – 500

2.3.4 ASPECTOS TEÓRICOS DE RESISTIVIDAD

Es importante que en materiales detríticos la resistividad aumente con el tamaño del grano. Por tanto, en una investigación hidrogeológica en materiales detríticos, buscaremos resistividades elevadas que indican los materiales más gruesos, mayor permeabilidad (Sánchez F. , 2012).

Ahora consideremos un flujo de corriente en un medio homogéneo isotrópico como lo muestra la figura 2.5, a continuación:

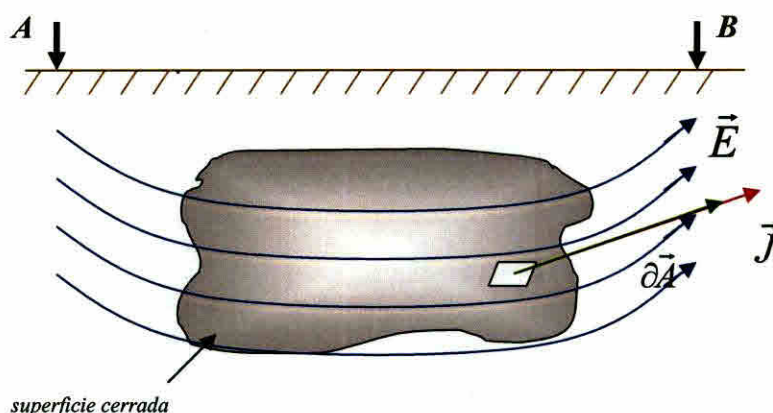


Figura 2.5 Superficie cerrada sometida por una intensidad de campo eléctrico y a una densidad de corriente eléctrica por los electrodos A y B.

donde \vec{E} es la intensidad del campo eléctrico, \vec{J} es la densidad de corriente eléctrica y $d\vec{A}$ es el elemento de área; con esto observamos que:

$$\begin{aligned}\partial\Phi &= \vec{J} \cdot d\vec{A} \\ \Rightarrow \Phi &= \oint_S \vec{J} \cdot d\vec{A}\end{aligned}\quad (2.6)$$

Si no existen fuentes ni suministros dentro de la superficie cerrada

$$\Phi = \oint_S \vec{J} \cdot d\vec{A} = 0 \quad (2.7)$$

Por la Ley de Ohm:

$$\begin{aligned}\vec{J} &\propto \vec{E} \\ \vec{J} &= \sigma \vec{E}\end{aligned}$$

donde σ es la conductividad del medio.

La intensidad de campo eléctrico $\vec{E} = -\nabla V_{(x,y,z)}$; y aplicando la Ley de Gauss a la ecuación 2.7 tenemos que:

$$\Phi = \oint_S \vec{J} \cdot d\vec{A} = \int_V \nabla \cdot \vec{J} dV = 0 \quad (2.8)$$

Utilizando la ecuación 2.7 y 2.8 tenemos que:

$$\begin{aligned}\nabla \cdot \vec{J} &= 0 \\ \nabla \cdot (\sigma \nabla V) &= 0\end{aligned}$$

por identidad vectorial

$$\nabla \sigma \cdot \nabla V + \sigma \nabla^2 V = 0 \quad (2.9)$$

como el primer término desaparece, la ecuación 2.9. Queda:

$$\sigma \nabla^2 V = 0; \quad (2.10)$$

como σ es constante, nos queda la ecuación de Laplace (potencial armónico)

$$\Rightarrow \nabla^2 V = 0 \quad (2.11)$$

En la práctica la energía eléctrica es transmitida al medio por dos electrodos, los cuales pueden estar dentro o sobre la superficie del terreno (figura 2.6).

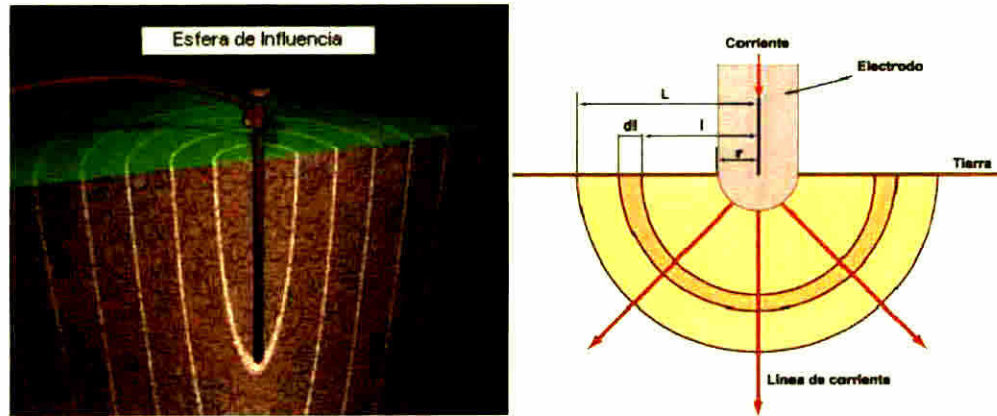


Figura 2.6 Intensidad de Corriente I en el suelo en un punto A con un volumen semiesférico de radio r y espesor dr . Tomado de (Lausanne, 2009).

Debido a la simetría esférica, el potencial V sólo es función de r

$$r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$$

En coordenadas cartesianas: $V = f(x, y, z)$

En coordenadas esféricas: $V = f(r)$

En un medio homogéneo e isotrópico la función potencial satisface la ecuación de Laplace:

$$\nabla^2 V_{(x,y,z)} = 0 \quad (2.12)$$

La ecuación de Laplace en coordenadas esféricas es:

$$\nabla^2 V(r, \varphi, \theta) = \frac{\partial}{\partial r} \left[r^2 \frac{\partial V}{\partial r} \right] + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left[\sin \theta \frac{\partial V}{\partial \theta} \right] + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \left[\frac{\partial^2 V}{\partial \varphi^2} \right]$$

simplificando:

$$\nabla^2 V(r) = \frac{\partial}{\partial r} \left[r^2 \frac{\partial V}{\partial r} \right] = 0$$

obtenemos la siguiente solución:

$$r^2 \frac{dV}{dr} = C \quad (2.13)$$

donde **C** es una constante, entonces:

$$\begin{aligned} dV &= C \frac{dr}{r^2} \\ \Rightarrow V(r) &= -\frac{C}{r} + D \end{aligned} \quad (2.14)$$

donde **D** es otra constante.

Cuando $r \rightarrow \infty$, $V(\infty) = 0$. Donde concluimos que $D = 0$.

Ahora $I = \oint_S \vec{J} \cdot d\vec{A} = \oint_S J dA \cos 0^\circ$ y la superficie es esférica, tenemos que:

$$I = 4\pi r^2 J = 4\pi r^2 \sigma E = -4\pi r^2 \sigma \frac{dV}{dr} \quad (2.15)$$

Utilizando la ecuación 2.14 y aplicándole un cálculo diferencial con respecto a r , obtenemos:

$$\frac{d(V_r)}{dr} = \frac{d\left(-\frac{C}{r}\right)}{dr} = \frac{C}{r^2} \quad (2.16)$$

y reemplazándola en la ecuación 2.16, nos queda:

$$\begin{aligned} I &= \frac{-4\pi r^2}{\rho} \cdot \frac{C}{r^2} \\ C &= -\frac{\rho r^2 I}{4\pi r^2} = -\frac{\rho I}{4\pi} \end{aligned} \quad (2.17)$$

por consiguiente

$$\begin{aligned} V(r) &= \frac{-C}{r} = \frac{\rho I}{4\pi r} \\ \rho &= 4\pi r \frac{V}{I} \end{aligned} \quad (2.18)$$

donde $\sigma = \frac{1}{\rho}$.

Para introducir la intensidad de corriente, debe existir otro electrodo B (figura 2.7), por lo cual el potencial generado en el punto M será igual al producido por A menos el producido por B:

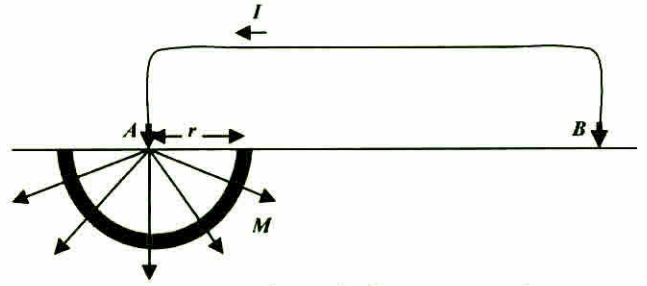


Figura 2.7 Un electrodo de corriente sobre una superficie. Modificado de (Roman, 2009)

$$V_M = \frac{\rho I}{2\pi AM} - \frac{\rho I}{2\pi BM} \quad (2.19)$$

Donde la expresión se representa con 2π , ya que se está analizando la mitad del hemisferio donde se inyecta la intensidad de corriente.

Pero en la práctica no medimos el potencial en un punto, sino la diferencia de potencial entre los puntos M y N (figura 2.12). Donde el potencial en el punto N está expresado por:

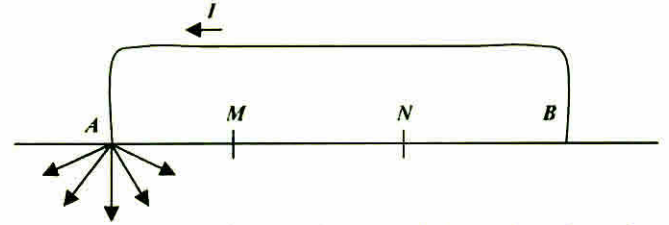


Figura 2.12 Diferencia de Potencial entre los electrodos M y N. Modificado de (Roman, 2009)

$$V_N = \frac{\rho I}{2\pi AN} - \frac{\rho I}{2\pi BN} \quad (2.20)$$

Por lo tanto la diferencia de potencial entre los puntos M y N será:

$$V_M - V_N = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right)$$

Despejando la resistividad ρ obtenemos:

$$\rho = \frac{\Delta V}{I} \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right)} \quad (2.21)$$

Simplificando, y llamando K a la segunda fracción, la expresión resultante es la utilizada en el campo en cada medida:

$$\rho = \frac{\Delta V}{I} K \quad (2.22)$$

La constante K se denomina coeficiente geométrico del dispositivo porque depende solamente de las distancias entre los cuatro electrodos. Si se trabaja con distancias predeterminadas los valores de K ya se llevan calculados.

Para determinar la ecuación 2.22 no hemos necesitado suponer que los electrodos A, B, M, N estén en una disposición especial de modo que colocándolos en cualquier posición para obtener la resistividad del subsuelo simplemente hay que dividir la lectura del voltímetro por la lectura del amperímetro y multiplicarlo por K .

El valor de ρ obtenido sería la resistividad real del terreno si este fuera homogéneo e isotrópico, pero es habitual que la ρ obtenida sea una mezcla de las resistividades de diversos materiales (medio heterogéneo e isotrópico) por lo tanto lo denominamos resistividad aparente ρ .

Hay que tener en cuenta que la Geofísica es una ciencia conexas de la Geología que es más importante y más antigua debido a la importancia de conocer la composición del subsuelo y la ubicación de cierto tipo de minerales así como la ubicación de acuíferos. Sin embargo el planteamiento y la interpretación final de un problema de prospección suelen ser los geólogos mientras que el desarrollo de la misma se lleva a cabo por uno o varios métodos geofísicos (la Geofísica sería el imprescindible auxiliar de la Geología). Realmente en toda prospección existe una cierta interdependencia entre el geólogo y el geofísico ya que el primero debe tener los suficientes conocimientos geofísicos para poder dar interpretación geológica al mapa de anomalías de geofísico y este debe tener a su vez los conocimientos geológicos necesarios para poder planificar el trabajo e interpretar bien sus medidas geofísicas. La interpretación final será fruto del acuerdo entre la hipótesis del geólogo y las del geofísico.

2.3.5 TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA

Para obtener un modelo más preciso del subsuelo en la actualidad se utiliza con mayor frecuencia los modelos de sondeos eléctricos bidimensionales (2D) y tridimensionales (3D) donde la resistividad cambia tanto en la dirección vertical como en la dirección horizontal a lo largo de la línea del relevamiento. En estos casos se presume que la resistividad en la dirección perpendicular a la línea del sondeo no varía. En muchas situaciones particularmente para relevamientos sobre cuerpos geológicos o anomalías alargadas (López et al. 2006). Al sondeo eléctrico bidimensional y tridimensionales se le denomina Tomografía Eléctrica (figura 2.9) que es un método prospectivo geoelectrónico que analiza los materiales del subsuelo en función de su comportamiento eléctrico es decir que es un diferenciador de los mismos en función de su valor de resistividad eléctrica propiedad de los materiales que indica su grado de oposición a conducir la corriente eléctrica a partir de los valores de resistividad aparente obtenidos mediante medidas realizadas por métodos convencionales de corriente continua. El proceso de adquisición de datos consiste en la implantación de numerosos electrodos a lo largo del perfil de medida con un arreglo de electrodos específico de acuerdo al grado de resolución y la profundidad de investigación que se necesite.

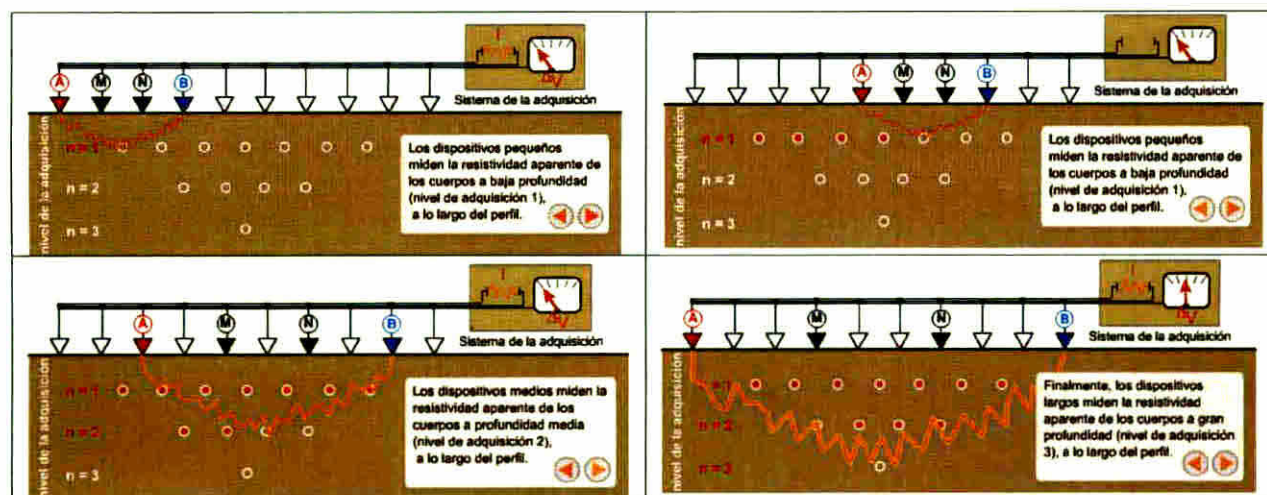


Figura 2.9 Esquema de adquisición en tomografía 2D tipo Wenner. Tomado de (Lausanne, 2009).

Un factor clave de esta técnica es el número y distribución de los electrodos, ya que de él depende tanto su resolución como la profundidad de investigación. Como regla general, un estudio mediante Tomografía eléctrica requiere la obtención de un número muy elevado de datos con un pequeño espaciado entre medidas para conseguir la necesaria resolución lateral y que también las medidas se realicen involucrando de forma progresiva varios rangos de profundidad (Porres et al, 2006).

El resultado final de este tipo de estudio es una sección distancia–profundidad con la distribución de la resistividad real del subsuelo. Para interpretar esta sección, es necesario conocer de forma aproximada los materiales esperables, y con ello los rangos de resistividad entre los que varía su resistividad, y así por atribución, identificar unidades litológicas de distinta naturaleza, litologías con distinta textura o grado de alteración, aspectos estructurales (fallas) y geomorfológicos (cuevas y rellenos), etc.

Actualmente antes de hacer un estudio del subsuelo mediante el método de la tomografía eléctrica, se debe conocer los parámetros geológicos y correlacionarlos geoelectricamente para modelarlos y así poder tener resultados previos a las medidas reales y poder correlacionar los datos reales medidos del entorno con los resultados de los modelos y así hacer arreglos y llegar a conclusiones del estudio.

Anteriormente se ha establecido que la medición de la resistividad eléctrica aparente en la superficie mediante diversos arreglos electródico permite esclarecer la naturaleza de diversas estructuras. Sin embargo esta tarea formidable no es tan simple como pudiera parecer, ya que se trata de medir aquello con lo que no se está en contacto. La metodología empleada en geofísica para lograr deducir mediante métodos indirectos la naturaleza de nuestro entorno está orientada a resolver dos problemas:

- El problema directo
- El problema inverso

El problema directo consiste, fundamentalmente, en obtener soluciones analíticas, exactas y aproximadas en la superficie cuando se consideran cuerpos de formas diversas como pueden ser

cilindros esferas sólidas o huecas en otras palabras se obtiene el efecto que ejercería tal o cual cuerpo de forma dimensiones y propiedades específicas sobre un sensor instalado sobre la superficie del terreno Estas soluciones permiten en el caso eléctrico poder determinar qué tipo de arreglo electrodico es el mas adecuado para poder detectar una falla vertical o bien una cavidad hueca

El problema inverso se define por otro lado como la metodología empleada para extraer información útil de nuestro medio físico empleando datos en forma numérica de alguna propiedad de este entorno Estas propiedades también se referirán como método específico (normalmente una teoría matemática o modelo) que relaciona los parámetros con los datos

El problema inverso contrasta con el problema directo donde se predicen los datos a partir de los parámetros y de un modelo Normalmente el problema inverso es mas difícil de resolver que su correspondiente problema directo Este problema aparece en muchas otras ramas de las ciencias físicas como pueden ser la tomografía médica el procesamiento de imágenes o el ajuste de curvas

El problema inverso obtiene la distribución de conductividades del subsuelo a partir de las medidas realizadas en la superficie La no linealidad del problema inverso original se resuelve normalmente mediante el uso de métodos iterativos Estos métodos obtienen para cada iteración el modelo (la matriz de sensibilidad o Jacobiana) y los datos se usa algún método numérico (elementos finitos diferencias finitas) La técnica empleada para la inversión de los datos obtenidos en campo consiste en una nueva implementación del método de mínimos cuadrados basada en una optimización quasi newtoniana Esta técnica es aproximadamente 10 veces más rápida que el método convencional de mínimos cuadrados para grandes cantidades de datos y requiere menos memoria de computadora Todo este procedimiento está basado en la siguiente ecuación

$$(J^T J + uF)d = J^T g \quad (2.23)$$

donde

$$F = f_x f_x^T + f_z f_z^T \quad (2.24)$$

f = filtro horizontal

f = filtro vertical

J = matriz de derivadas parciales

u = factor de amortiguamiento

d = es el vector de perturbación del modelo y finalmente

g es el vector de discrepancia

Las imágenes de la distribución de conductividad del subsuelo obtenidas consisten en la determinación de la conductividad de cada una de las celdas en las que se divide Si el subsuelo está formado por capas horizontales de diferente conductividad y espesor el medio se discretiza en capas más que en celdas (Salgado Contreras & Vizcarra 2002)

En el caso 2D (Dos Dimensiones) se discretiza en celdas cúbicas (o en forma de paralelepípedos) la sección transversal a la superficie que está justo debajo de la agrupación de electrodos La figura 2.14 muestra un ejemplo con 80 celdas (16 en horizontal por 5 en vertical) Esta forma tan

especial de discretizar el subsuelo se utiliza principalmente para la detección de estructuras alargadas en el subsuelo (p.e. tuberías), colocando los electrodos perpendicularmente a dichas anomalías.

En el caso 3D (tres dimensiones) se discretizan varias secciones transversales, por lo que los resultados pueden ser más realistas que en el caso 2D. El modelado del subsuelo en 2D tiene la ventaja respecto al 3D de reducir el número de celdas y, por tanto, el tiempo de cálculo de la matriz de sensibilidad (figura 2.10 y figura 2.11). Por el contrario, un modelado 3D da una visión más realista de la distribución de conductividad del suelo.

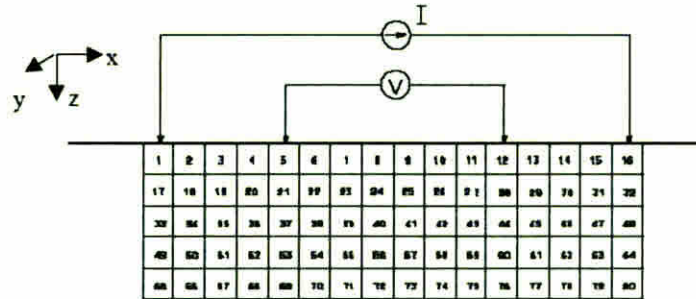


Figura 2.10 Discretización 2D del Subsuelo. Tomado de (Salgado, Contreras, & Vizcarra, 2002).

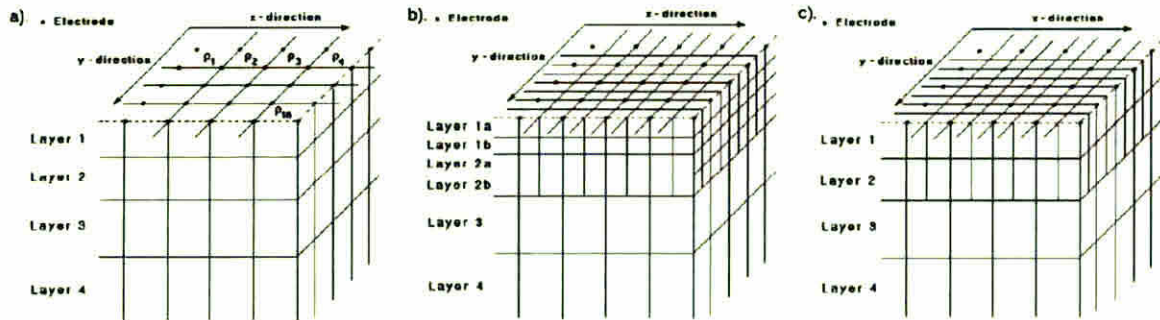


Figura 2.11 Modelos usando la inversión en 2D y 3D. Tomado de (Loke, 2001).

A continuación se exponen los dispositivos que se emplean más a menudo en tomografía eléctrica (figura 2.12):

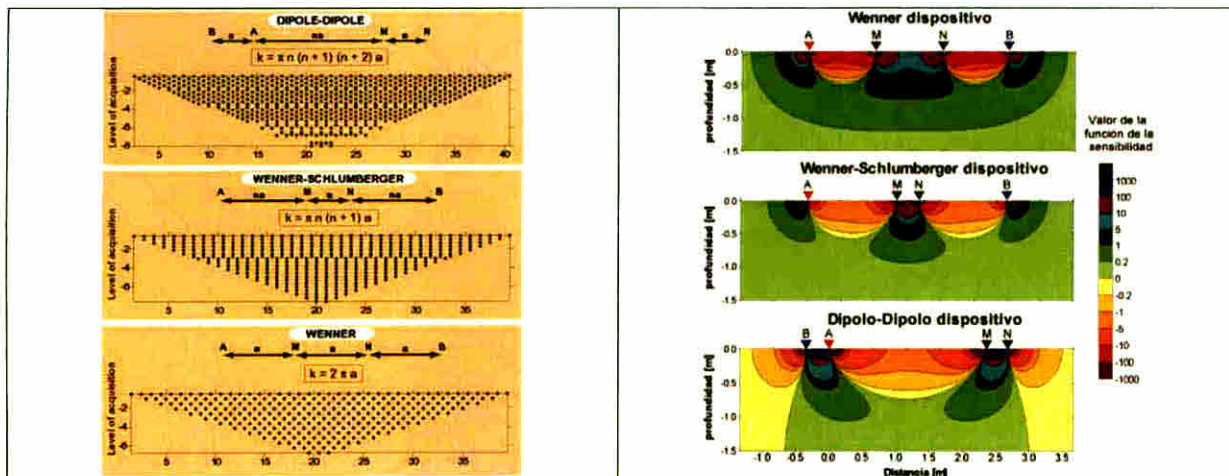


Figura 2.12 Dispositivos que se emplean más a menudo en tomografía eléctrica. Tomado de (Lausanne, 2009).

Se constata inmediatamente que los valores de esta función difieren según los dispositivos. Ellos van a tener por tanto cada uno sus características propias. Esto es sobre todo válido a gran distancia de los electrodos. La diferencia de forma de esta función nos permitirá apreciar mejor la respuesta de los diferentes dispositivos a los diferentes tipos de estructuras.

La figura 2.13 presenta las tomografías eléctricas obtenidas con tres arreglos electrodico diferentes sobre un modelo constituido por dos cuerpos idénticos, infinitamente largos en la dirección perpendicular al dispositivo y alejados cuatro veces su anchura. Las formas engendradas por un objeto idéntico difieren ampliamente en función del dispositivo empleado. Es la razón por la cual, es casi imposible interpretar correctamente una tomografía no invertida (sin inversión). Tanto es posible de hacer algunas hipótesis sobre la distribución de las resistividades aparentes.

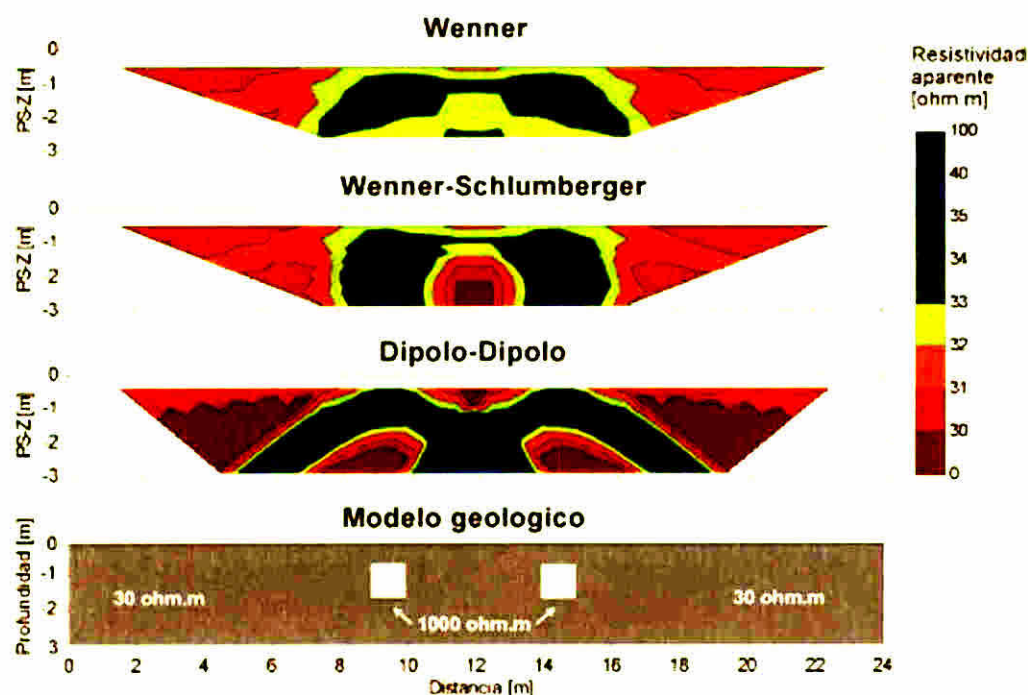


Figura 2.13 Resistividades aparentes de un mismo modelo utilizando 3 dispositivos diferentes.
Tomado de (Lausanne, 2009).

La Profundidad de Investigación es la profundidad a la que se puede inyectar corriente al medio y obtener un resultado confiable de la resistividad de éste. El cual depende del arreglo de electrodos y de la separación entre éstos (parámetro a). En la tabla 2.2 se muestra como varía la profundidad de investigación, normalizada por el parámetro a y por el largo del arreglo, en función del tipo de arreglo de electrodos. También se muestra el cálculo del factor geométrico, tomando el parámetro a igual a 1,0 m. Por ejemplo para un arreglo dipolo-dipolo, si la máxima separación (a) entre los electrodos es de 5,0 m, y el máximo factor n es de 6, entonces el largo total del arreglo será de 40,0 m y por lo tanto, la profundidad de investigación máxima se calculará aproximadamente igual a 8,5 m.

Tabla 2.2 Tabla característica de los parámetros de investigación. *Fuente:* (Loke, 2001)

Tipo de Arreglo		Z_e/a	Z_e/L	Factor Geométrico	Factor Geométrico Inverso
Wenner Alpha		0,519	0,173	6,2832	0,15915(1,0000)
Wenner Beta		0,416	0,139	18,850	0,05305(0,3333)
Wenner Gamma		0,594	0,198	9,4248	0,10610(0,6667)
Dipolo-Dipolo	n = 1	0,416	0,139	18,850	0,05305(0,3333)
	n = 2	0,697	0,174	75,398	0,01326(0,0833)
	n = 3	0,962	0,192	188,50	0,00511 (0,01,11)
	n = 4	1,220	0,203	376,99	0,00265(0,0166)
	n = 5	1,476	0,211	659,73	0,00152(0,00%)
	n = 6	1,7,10	0,216	1055,6	0,00095(0,0060)
	n = 7	1,983	0,220	1583,4	0,00063(0,0040)
	n = 8	2,236	0,224	2261,9	0,00044(0,0028)
Ecuatorial Dipolo-Dipolo					
	n = 1	0,451	0,319	21,452	0,04662(0,2929)
	n = 2	0,809	0,162	1 19,01	0,00840(0,0528)
	n = 3	1,180	0,373	367,31	0,00272(0,0171)
	n = 4	1,556	0,377	841,75	0,00119(0,0075)
Wenner-Schlumberger					
	n = 1	0,519	0,171	6,2832	0,15915(1,0000)
	n = 2	0,925	0,186	18,850	0,05305(0,3333)
	n = 3	1,318	0,189	37,699	0,02653(0,1667)
	n = 4	1,706	0,190	62,832	0,01592(0,1000)
	n = 5	2,093	0,190	94,248	0,01061(0,0667)
	n = 6	2,478	0,191	131,95	0,00758(0,0476)
	n = 7	2,861	0,191	175,91	0,00568(0,0157)
	n = 8	3,247	0,191	226,19	0,00442(0,0278)
	n = 9	3,632	0,191	282,74	0,00354(0,0222)
	n = 10	4,012	0,191	345,58	0,00289(0,0182)
Polo-dipolo	n = 1	0,519		12,566	0,07958(0,5000)
	n = 2	0,925		17,699	0,02651(0,1667)
	n = 3	1,318		75,398	0,01326(0,0833)
	n = 4	1,706		125,66	0,00796(0,0500)
	n = 5	2,091		188,50	0,00511 (0,0114)
	n = 6	2,478		263,89	0,00379(0,0238)
	n = 7	2,863		351,86	0,00284(0,0178)
	n = 8	1,247		452,19	0,00221 (0,0119)
Polo-Polo		0,867		6,28319	0,15915(1,0000)

Profundidad de Investigación Z_e , normalizada por el parámetro a y el largo (L) del arreglo de electrodos, y factor geométrico para $a = 1,0$ m, para distintos arreglos de electrodos.

2 4 HIDROQUIMICA EN AGUAS SUBTERRANEAS

La hidroquímica estudia la composición química de las aguas naturales y las leyes que la gobiernan los cambios en la composición como resultado de los procesos químicos físicos y biológicos que se producen en los diferentes medios ambientes circundantes de los diferentes cuerpos de aguas La hidroquímica es importante para el desarrollo de la hidrogeología y de un estudio hidrogeofísico ya que proporciona el conocimiento de la composición química del agua para determinar su calidad En cuanto a las aguas subterráneas se encarga en determinar la formación de su composición y los procesos de la interacción las características físico químicas del agua varían a lo largo de su tránsito por el ciclo hidrológico

Cuando se analiza una muestra de agua subterránea se puede obtener además de una descripción cuantitativa de sus componentes una idea de cuáles han sido algunas de las principales reacciones y procesos modificadores por los que ha pasado

2 4 1 PARAMETROS FÍSICOS (TRAZADORES NATURALES)

2 4 1 1 TEMPERATURA

La temperatura debe ser medida in situ debido a que una muestra de agua alcanzará gradualmente la misma temperatura que el aire circundante

2 4 1 2 CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA

La conductividad es la capacidad de agua para conducir una corriente eléctrica también se le conoce como conductancia específica esta depende de la concentración de iones en solución La conductividad se mide en $\mu\text{S}/\text{cm}$ La medición debe ser realizada in situ o en el campo inmediatamente después de una muestra de agua se ha obtenido debido a que ocurren cambios de conductividad con el tiempo de almacenamiento

2 4 1 3 pH

El pH es la medición de la actividad de ácido/base en solución específicamente es el logaritmo común negativo de la actividad/concentración del ion de hidrógeno Proporcionar información importante sobre muchos procesos químicos y biológicos y proporciona correlaciones indirectas a una serie de deficiencias

2 4 2 COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS (IONES MAYORITARIOS)

2 4 2 1 ALCALINIDAD TOTAL

La alcalinidad del agua es su capacidad para neutralizar el ácido La cantidad de un ácido fuerte necesario para neutralizar la alcalinidad se llama la alcalinidad total y se reporta en mg/L de HCO_3 La alcalinidad de algunas aguas es debida únicamente a los bicarbonatos de calcio y de magnesio Para pH de agua menores a los 8.3 su alcalinidad total es prácticamente idéntica a bicarbonato

2 4 2 2 ION CLORURO

El anión cloruro por lo general está presente en aguas naturales. Una alta concentración se produce en aguas que han estado en contacto con cloruro que contiene formaciones geológicas. De lo contrario, una alta contenido de cloruro puede indicar contaminación por aguas residuales o desechos industriales o por la intrusión de agua de mar o agua salina en un cuerpo de agua dulce o de un acuífero.

El agua de lluvia puede ser una fuente importante de ion cloruro, especialmente en zonas próximas a la costa. La concentración de cloruro en el agua de lluvia disminuye rápidamente tierra adentro.

El ion cloruro no forma sales de baja solubilidad, no se oxida ni se reduce en aguas naturales, no es adsorbido significativamente ni entra a formar parte de procesos bioquímicos, lo que le da un carácter de trazador casi ideal.

2 4 2.3 ION SODIO

El sodio es un elemento común, es la sexta más abundante y se encuentra presente en cierta medida en la mayoría las aguas naturales. Las concentraciones varían de insignificante en agua dulce a considerable en agua de mar.

El sodio es liberado por la meteorización de silicatos tipo albita y la disolución de rocas sedimentarias de origen marino y depósitos evaporíticos en que se presenta fundamentalmente como NaCl.

Una fuente importante de sodio la constituyen los aportes de agua marina en regiones costeras tanto por fenómenos de intrusión en acuíferos costeros como por infiltración del agua de lluvia a la que se incorpora desde el mar.

Las sales de sodio son altamente solubles y tienden a permanecer en solución ya que no se producen entre ellas reacciones de precipitación como ocurre en el caso del Ca. Sin embargo, el sodio puede ser adsorbido en arcillas de elevada capacidad de cambio catiónico y puede ser intercambiado por Ca provocando una disminución de la dureza de las aguas (ablandamiento natural).

2 4 2 4 ION SULFATO

Sulfato es un ion abundante en la corteza de la tierra y su concentración en el agua puede variar desde unos pocos miligramos a varios miles de miligramos por litro. Los residuos industriales y drenaje de minas pueden contener altas concentraciones de sulfato. Sulfato también resulta de la descomposición de compuestos orgánicos que contienen azufre.

El ion sulfato procede del lavado de terrenos formados en ambiente marino, de la oxidación de sulfuros que se encuentran ampliamente distribuidos en rocas ígneas y sedimentarias, de la descomposición de sustancias orgánicas, etc. Sin embargo, la disolución de yeso anhidrita y otros tipos de sulfatos dispersos en el terreno representa frecuentemente el aporte cuantitativamente más significativo de este ion a las aguas subterráneas.

El ion sulfato está sometido a procesos de reducción especialmente en presencia de bacterias y de materia orgánica. En ambientes reductores a pH menor que 7 la forma reducida estable es el H_2S mientras que en soluciones alcalinas predomina el ion HS^- .

2 4 2 5 ION MAGNESIO

El magnesio es un elemento relativamente abundante en la corteza terrestre y por lo tanto es un componente común del agua natural. Las aguas asociadas con granito o arena silicea pueden contener menos de 5 mg de magnesio por litro. El agua en contacto con la dolomita o roca caliza rica en magnesio puede contener de 10 mg/L – 50 mg/L y varios cientos de miligramos por litro pueden estar presentes en el agua que ha estado en contacto con los depósitos que contienen sulfatos y cloruros de magnesio.

Por una acción similar a la de calcio el magnesio imparte dureza al agua. Esto puede ser reducido por ablandamiento químico o por intercambio iónico. Cabe señalar que la diferencia entre la dureza total y la concentración de calcio se puede utilizar para calcular la concentración de magnesio.

2 4 2 6 ION NITRATO

El nitrato es la forma más altamente oxidada de compuestos de nitrógeno. Puede estar presente en las aguas superficiales y subterráneas debido a que es el producto final de la descomposición aeróbica de la materia orgánica nitrogenada. Fuentes significativas de nitrato son los fertilizantes químicos de la tierra cultivada y el drenaje de predios ganaderos así como aguas residuales y algunas aguas industriales.

La determinación de nitrato nos ayuda a la evaluación del carácter y el grado de oxidación en las aguas superficiales. En las aguas subterráneas penetrando a través de capas de suelo en los procesos biológicos y en el tratamiento avanzado de aguas residuales.

La determinación de nitrato en el agua es difícil debido a las interferencias y mucho más difícil en las aguas residuales debido a concentraciones más altas de numerosas sustancias interferentes.

2 4 2 7 ION POTASIO

La presencia del ion potasio procede de la meteorización de feldespatos y ocasionalmente de la solubilización de depósitos de evaporitas. En particular de sales tipo silvina o carnalita. A pesar de que el potasio es un elemento relativamente abundante su concentración en aguas frescas naturales es por lo general menos de 10 mg/L. En agua de mar sin embargo puede contener tanto como 400 mg/L de potasio o más.

2 4 2 8 SILICIO

Después de oxígeno el silicio es el elemento más abundante en la corteza terrestre. Es un componente importante de las rocas ígneas y metamórficas. Los minerales de arcilla tales como caolín, feldespatos y cuarzo. Aunque la sílice cristalina es un componente importante de muchas rocas ígneas y también en las areniscas que tiene baja solubilidad y por lo tanto es una fuente de importancia limitada de sílice en el agua. Es probable que la mayoría de la sílice disuelta en agua

se origine a partir de la descomposición química de los silicatos en los procesos de metamorfismo o intemperie.

2.4.2.9 ION CALCIO

El calcio se disuelve de casi todas las rocas, como las aguas asociados con granito o arena silícea, estas contienen habitualmente menos de 10 mg de calcio por litro. Las muchas aguas en zonas de roca caliza pueden contener 30 mg/L – 100 mg/L y la asociada con esquisto yesífero puede contener varios cientos de miligramos por litro. El calcio contribuye a la dureza total del agua.

2.4.3 DIAGRAMAS HIDROQUÍMICOS

Los Diagramas Hidroquímicos son representaciones gráficas que muestran sintéticamente las características químicas principales de un agua, facilitando su clasificación. Entre estas gráficas podemos mencionar:

2.4.3.1 DIAGRAMAS DE PIPER

Las concentraciones de los iones mayoritarios se pueden representar en diagrama de concentraciones de trilineal, los seis iones de interés se convierten en miliequivalentes por litro (meq/L), una unidad de concentración igual a la concentración en miligramos por litro dividido por el peso equivalente (peso atómico dividido por la valencia). Cada valor del catión se representa a continuación, como un porcentaje de la concentración total (meq/L) de todos los cationes en consideración, en el triángulo inferior izquierdo del diagrama. Del mismo modo, los valores de aniones individuales se representan, en forma de porcentajes de la concentración total de todos los aniones en consideración, en el triángulo inferior derecho (figura 2.14). Los posibles valores son proyectados en el campo central en forma de diamante. Fundamentalmente la interpretación de la naturaleza química de una muestra de agua se basa en la ubicación de los valores de iones de muestra dentro del campo central.

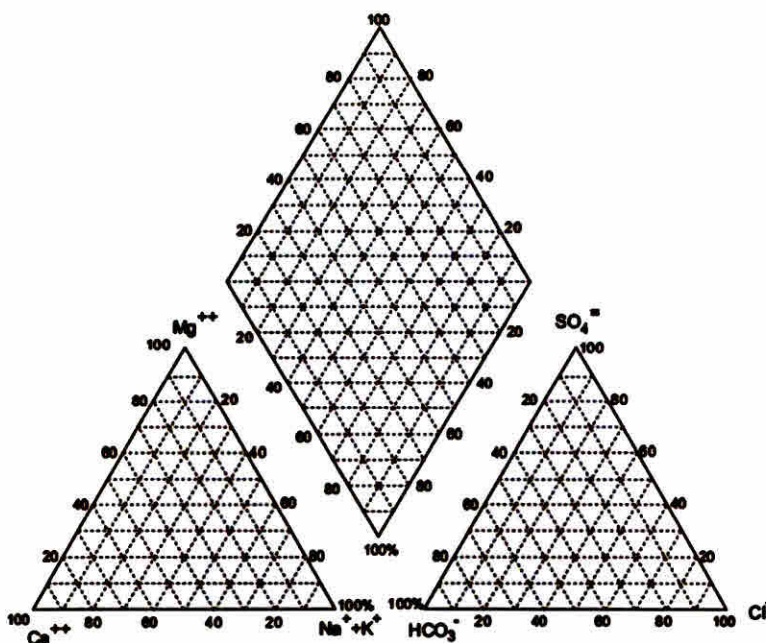


Figura 2.14 Diagramas de Piper. Tomado de (Llanuras, 2005).

2.4.3.3 DIAGRAMAS DE STIFF

Diagramas de Stiff son comúnmente utilizados para la visualización de las principales composiciones de iones de las aguas subterráneas. La forma del diagrama indica la proporción relativa de los diferentes iones y el tamaño indica las concentraciones totales. El diagrama de Stiff se puede representar espacialmente en un mapa del sitio de investigación y sus representación espacial no proporciona una comparación visual para descifrar el sentido de flujo del agua subterránea en la región (Singh & Gewali, 2010).

El polígono se construye uniendo los extremos de segmentos asociados a determinados aniones y cationes ordenados de forma específica (figura 2.16).

CARACTERÍSTICAS

- Permite visualizar claramente diferentes tipos de agua (cada una con una configuración particular)
- Permite dar idea del grado de mineralización (ancho de la gráfica)
- Permite apreciar los valores de las relaciones iónicas con respecto a la unidad y la variación de las relaciones entre cationes y entre aniones de una muestra.
- Permite en un mapa descifrar el sentido de flujo del agua subterránea.

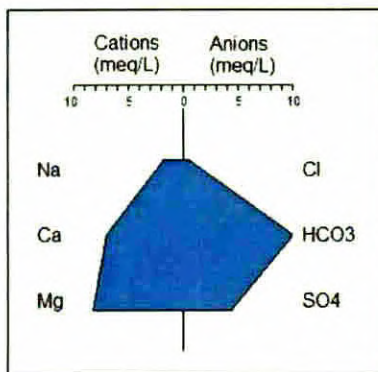


Figura 2.16 Diagramas de Stiff. Tomado de (Wikipedia, 2012)

2.5 INTRUSIÓN SALINA

La relativa “abundancia aparente de agua” disponible para la humanidad hace que la gente se olvida fácilmente su importancia e insustituible para la vida. En el sistema hidráulico de la tierra, cuando el agua dulce subterránea es bombeada de pozos a un ritmo rápido de lo que puede ser repuesta, se produce con una disminución resultante en la presión hidrostática en general. Cuando esto ocurre cerca de una zona costera del océano, agua marina se entromete en el acuífero de agua dulce (Figura 2.17). El resultado es que el agua dulce suministra contaminado con agua salada, que ocurre en general en zonas costeras. Esta es la definición comúnmente entendido de la intrusión de agua salina.

La intrusión de agua salina, o de la invasión de agua de mar, se definir como "la migración de agua salada en los acuíferos de agua dulce, bajo la influencia de la explotación del agua subterránea".

En términos generales, se llama intrusión salina al movimiento permanente o temporal del agua salada tierra adentro, desplazando u ocupando el volumen correspondiente al agua dulce. El agua captada en un acuífero costero se contamina por efecto de la salinización cuando la zona activa de la captación se ve afectada por la zona de mezcla de ambos fluidos o por la propia agua salada. Sin embargo, no es este el único proceso de salinización, puesto que si la captación se establece en una masa de agua subterránea dulce por sobre el agua salada, puede producirse una ascensión de agua salada formando un domo o cono salino en la zona de la extracción del recurso hídrico. Otras veces esta contaminación puede provenir de infiltración de agua de otros acuíferos salinizados, que comúnmente se producen por deficiencias en la construcción y operación del pozo de extracción (Espinoza, 2005).

La intrusión de agua salina también puede incluir la cuña de agua salada en la zona de las aguas superficiales en los sistemas fluviales costeras, así como de agua salada en los humedales eustáticos. Este tipo de intrusión tiene un gran impacto en los sistemas ecológicos de regiones costeras, provocando muchos problemas ecológicos, ambientales, sociales y económicos de la misma. A pesar de que el impacto de la intrusión de agua salada sólo ha sido reconocido por un periodo relativamente corto, el resultado de este problema puede ser muy grave en el futuro. La extensión de la intrusión salina en la zona costera se debe a: formaciones geológicas presentes, gradientes hidráulicos, la velocidad de retirada del agua subterránea, y la recarga

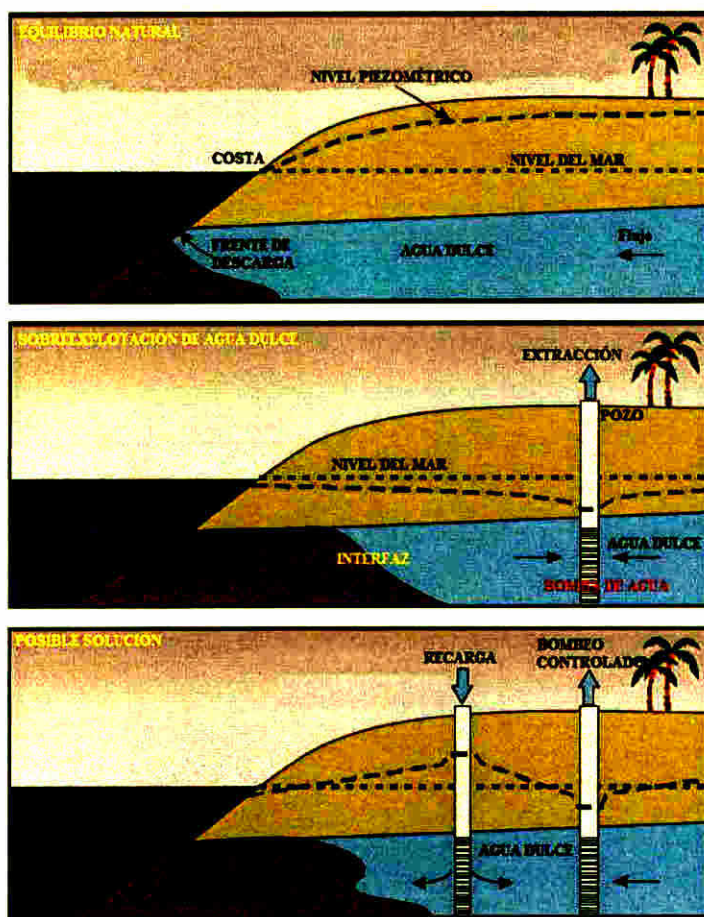


Figura 2.17 Fenómeno de la intrusión salina. Modificado de (Johnson, 2007)

CAPITULO III

METODOLOGÍA

3.1 METODOLOGÍA

3.1.1 RECOPIACIÓN Y SÍNTESIS BIBLIOGRÁFICA

Para la recopilación de la información existente se visitó las instalaciones MINSA en la Dirección Regional de Panamá Oeste específicamente en la dirección de Agua y Saneamiento, en donde la información prácticamente es nula pero se tomó información verbal de aquellos que realizan las perforaciones. Para la localización de los pozos de Punta Chame nos acompañó el Señor Balbino Quiroz, en la figura 3.1 muestra al Sr. Quiroz y al profesor Pedro Salinas momento en el que se visitaba a unos de los pozos de Punta Chame.



Figura 3.1 Pozo del MINSA en Punta Chame, construido con los fondos del PRODEC, (de izquierda a derecha señor Quiroz y el profesor Salinas).

En el poblado de Chame se identificó la estación meteorológica más cercana que se encuentra está ubicada en Chame, estos datos fueron suministrados por ETESA, para realizar los gráficos comparativos de precipitaciones durante el periodo 1978–2010.

Se hicieron visitas a las oficinas del IDAAN que se encuentra en Chitré, en la Dirección de Fuente Subterránea y MINSA en Panamá Oeste, y los pozos existentes no cuentan con la descripción litológica de los pozos.

En la Dirección de Fuente Subterráneas del IDAAN en la ciudad de Chitré se realizó búsqueda de información en los archivos de perforaciones, sólo se obtuvo acceso a dos informaciones de perforaciones de pozo, pero de Chame, centro. Se nos informó que probablemente podría existir información en la dirección del IDAAN de Chorrera, pero cuando se fue a este establecimiento se nos informó que la información había desaparecido en 1995.

En el Ministerio de Desarrollo Agropecuario (MIDA) en la provincia de Veraguas, en la Dirección de Ingeniería en el departamento de agua no se encontró información en los archivos, sólo la ubicación de dos pozos perforados los cuales nunca se encontraron cuando se fue al sitio. De estas visitas a diferentes instituciones gubernamentales, podemos concluir que prácticamente la información litológica, parámetros hidráulicos y parámetros químicos de los pozos son nulos, por lo que la información que se releve de esta investigación servirá a las diferentes instituciones

como punto de referencia para futuras decisiones y para nosotros como punto de partida para futuras investigaciones.

Otro de los lugares donde se intentó conseguir información fue en la solicitud de concesión de agua de la Dirección de Cuenca de la ANAM, pero no se encontró información alguna, ya que la mayoría de los pozos son ilegales y las personas no han realizado su legalización, también se visitaron las juntas comunales donde solo se pudo conseguir la ubicación de los pozos a través de juntas de aguas.

La planta Potabilizadora de Chame se empezó a construirse en 2003 y no fue hasta el 2006 que se culminó con su construcción, esta planta se construyó con un costo de 3,6 millones de balboas para beneficiar a las comunidades de Chame, Bejuco, Gorgona y Coronado, sin tomar en cuenta al poblado de Punta Chame.

3.1.2 METODOLOGÍA DE CAMPO

3.1.2.1 METODOLOGÍA DE INFORMACIÓN GEOLÓGICA

La Campaña Geológica para identificar las diferentes formaciones geológicas existentes en el área de estudio y su verificación in situ, se utilizó un mapa geológico en 1:50000 de la ANAM y con la ayuda del Geólogo Eric Tejeira (figura 3.2), se hizo una campaña de reconocimiento del área de estudio, para confirmar las formaciones geológicas existentes en el área de estudio. Además se evaluó parte del estudio y características geológicas del área, por el Dr. José Bienvenido de España.



Figura 3.2 (izquierda) Ingeniero geólogo Erick Tejeira y otros en exploración geológica.
(derecha) Dr. José Bienvenido de la Universidad de Almería, España.

3.1.2.2 METODOLOGÍA DE CAMPO EN GEOFÍSICAS DE CAMPO

Se realizaron 14 tomografías eléctricas perpendiculares a la costa con separaciones entre ellas de, aproximadamente, de 300 m. Se hicieron dos tipos de tomografías, unos de 25 electrodos y otros de 28 electrodos, ambas con separaciones de 3,0 m entre cada electrodo.

También para obtener una calibración de los resultados se procedió a realizar 7 tomografías eléctricas paralela a los pozos, de 4,0 m a 7,0 m de profundidad, que abastecen al poblado, que se encuentran en el área poblada del centro de Punta Chame. De estas 7 tomografías eléctricas 5 se realizaron con 25 electrodos con separaciones de 3,0 m entre electrodos y 2 tomografías eléctricas de 28 electrodos con separaciones de 6,0 m entre electrodos, para recomendar futuras perforaciones.

Se realizaron dos tipos de arreglos eléctricos para comparar la respuesta de las tomografías eléctricas, estos arreglos fueron: Wenner y Schlumberger. De esta comparación resulto mejor realizar la Wenner, la cual nos ofrecía una mejor resolución de las tomografías eléctricas.

A cada una de las tomografías se les tomaron sus coordenadas con el GPS, para luego se representó su ubicación espacial en el área de estudio, las tomografías eléctricas se tomaron en aquellos lugares en donde era posible la accesibilidad a la costa y en aquellos lugares donde los resultados químicos nos indicaban indicio de intrusión salina. Con la ayuda de los datos adquiridos en las tomografías eléctricas se detectó la zona de intrusión salina, como las zonas posibles de perforación

Para realizar las tomografías eléctricas se utilizó el Resistivímetro del Subsuelo de Memoria (figura 3.3) y PI SUPER STING R1/PI de la empresa AGI (Avanced Geociences, Inc) que es un sistema automático de un solo canal usado para generar imágenes de resistividad, polarización inducida (PI) y potencial espontaneo (PE ó SP), usado en conjunto con el patentado sistema Automático Multi-electrodo Modo Doble Swift o con cables Pasivos y caja de conmutador (Switch box).

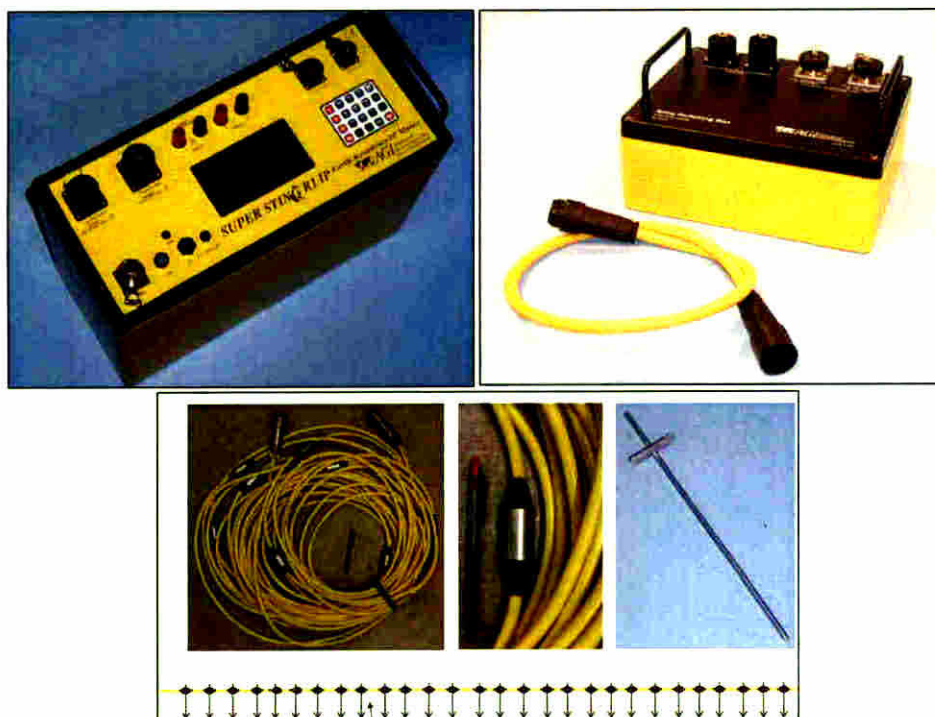


Figura 3.3 Resistivímetro, caja de conmutador y cables pasivos de la marca AGI (Hinojosa, 2010)

El instrumento puede ser programado para ejecutar automáticamente cualquier tipo de estudio de Resistividad/PI, ya que guarda un set de archivos de comando para el uso de distintas configuraciones de electrodos tales como Schlumberger, Wenner, Dipolo-Dipolo, Polo-Dipolo y Polo-Polo. En la figura 3.4 se muestra la adquisición de datos de tomografía de la zona de estudio con el equipo mencionado.



Figura 3.4 Adquisición de datos para realizar tomografías eléctricas en 2D y 3D, con el Geofísico Moisés Ortega y el Doctor Gabriel Parodi de la Universidad de Twente

Para la creación de las imágenes de resistividades, el equipo se conecta mediante una interface a una computadora y se extraen los datos y se utiliza el software EarthImager 1D, 2D y 3D (figura 3.5), según el caso de estudio. Con este software se puede crear modelos matemáticos de imágenes de resistividades conociendo la geología del área de estudio y dándoles valores aproximados de sus correspondientes resistividades, que pueden ayudar a fortalecer o discriminar las interpretaciones después de las medidas.

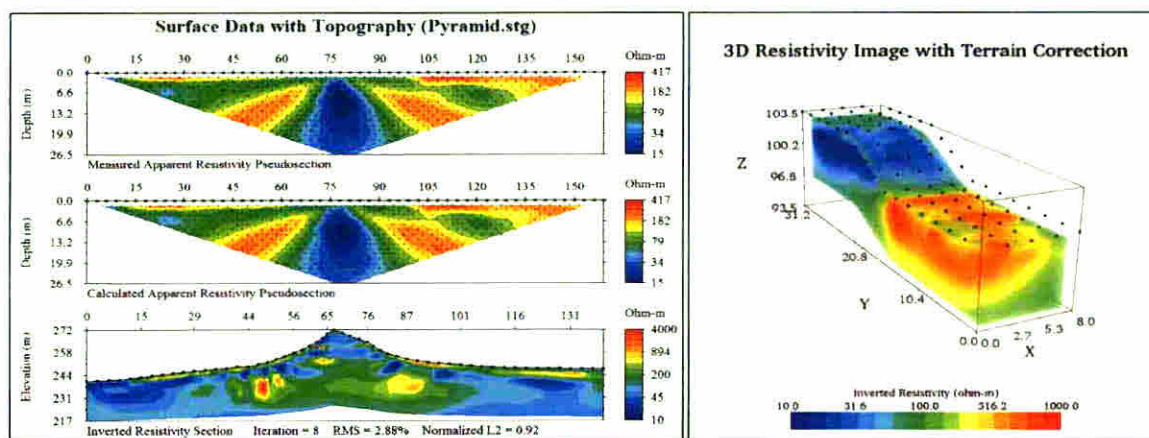


Figura 3.5 Software utilizados para el procesamiento de datos para las tomografías eléctricas (Hinojosa, 2010).

El software que se utilizará para interpretar los datos adquiridos será el EarthImager 2D y cuentan con especificaciones concreta, y mencionamos algunas:

- Es un software de inversión de Resistividad 2D y Potencial Inducido.
- Planeador de Estudio con modelo de entrada gráfico, modelación directa y estudio virtual con archivo de comando.
- Creador de archivos de comando para configuraciones no-estándares y mixtas.
- Inversión de datos de resistividad colectados con configuraciones no-estándares y mixtas.
- Opción Inversión de Lapso de Tiempo para monitoreo de resistividad desde la superficie y entre los sondeos.
- Corrección topográfica e impresión de sección de resistividad con características topográficas.
- Modelización directa de las diferencias finitas y elementos finitos.
- Cantidad de datos y número de electrodos ilimitados.

3.1.2.3 METODOLOGÍA DE CAMPO EN HIDROQUÍMICA

Paralelamente al muestreo del agua subterránea se realizaron distintas medidas fisicoquímica in situ, que concluyeron con la medición de temperatura, pH, y conductividad eléctrica y alcalinidad, con la supervisión internacional del Dr. Daniel Martínez de la Universidad de Mar del Plata, Argentina (imagen 3.6).

La temperatura del agua subterránea (°C) se midió con un termómetro de mercurio, para verificarla con la sonda multiparamétrica YSI-556, las cuales media simultáneamente a través de sus sensores la temperatura con una precisión de $\pm 0,15$ °C y rango de medida de -5 °C a 45 °C, el pH con una precisión de $\pm 0,2$ unidades y rango de medida de 0 a 14 unidades, la conductividad eléctrica con precisión de $\pm 0,5$ % de la lectura o $0,001$ mS/cm.

La tomas de las muestras se realizó durante el mes noviembre de 2012 y agosto de 2013, antes de la toma de muestra de agua se purgo el pozo para aquellos que no se encontraban funcionando hasta que los parámetros físicos se estabilizasen, el total de muestras medidas fueron 18. Estas muestras se tomaron en partidas de dos por pozo, una para metales y la otra para el análisis de bicarbonatos, nitratos, cloruro y sulfato; a una profundidad promedio de $3,5$ m, cerca de donde está colocada la bomba del pozo.



Figura 3.6 Dr. Daniel Martínez de la Universidad Nacional del Mar del Plata en gira en Punta Chame

3.1.2.4 DETERMINACIÓN QUÍMICA DE LABORATORIO

Los análisis químicos en laboratorio fueron realizados en los laboratorios del Centro de Investigaciones con Técnicas Nucleares (CITEN) y el Laboratorio de Investigaciones de Absorción Atómica de la Vicerrectoría de Investigación y Postgrado (VIP). En el primero de ellos se hicieron los análisis de: Nitrato, Sulfato, Sílice, Cloruro. En el laboratorio de Absorción Atómica de la VIP se realizaron los análisis de los metales: Sodio, Potasio, Calcio y Magnesio. Las técnicas analíticas utilizadas por el laboratorio de Absorción Atómica (figura 3.8) para las muestras fue la espectroscopia de absorción atómica (calcio y magnesio) y emisión atómica (sodio y potasio) y en el laboratorio especializado del CITEN un espectrofotómetro visible Hach, Dr 2800 (figura 3.7) y en la prueba de Cloruro se utilizó el método Mohr del Standard Methods.



Figura 3.7 Espectrofotómetro UV/visible Hach Dr 2800.

La data obtenida de los análisis químicos fue integrada mediante un Sistema de Información Geográfica (SIG), con las cuales se construyó los mapas de isoconcentraciones de nitrato, sulfato y cloruro. La caracterización hidroquímica del agua se utilizó el software AquaChem versión 4.0, el cual no facilitó definir los tipo de agua en base a los diagramas de Piper, Stiff y de Schoeller.



Figura 3.8 Equipo de adsorción y emisión atómica Shimatzu 6800 y análisis de resultados hidroquímicos con el Dr. Daniel Martínez de la Universidad Nacional del Mar del Plata, Lic. Ricardo Cañón y el Profesor Orlando Leone director del CITEN, Universidad de Panamá.

CAPITULO IV

RESULTADOS

4.1 RESULTADOS DE LA INFORMACIÓN GEOLÓGICA

La formación TM-CATu del Grupo Cañazas- Tocue constituida por materiales volcánicos como andesitas, basaltos, lavas, brechas y tobas, que es la que tiene las características más favorables para recibir, almacenar y transmitir agua, es decir con los elementos necesarios para definirla como con capacidad acuífera (Figura 4.1).



Figura 4.1 Formación Tocué, justamente en la entrada de Punta Chame.

La formación sedimentaria Río Hato (QR – Aha) del Grupo Aguadulce del Cuaternario Reciente compuesto por areniscas, lutitas carbonosas, conglomerados, depósitos orgánicos con pirita, tobáceas y arcillitas. Esta formación se aprecia en la figura 4.2,



Figura 4.2 Formación Geológica Río Hato (QR – Aha).

4.2 RESULTADOS GEOFÍSICOS

4.2.1 TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA

En esta investigación se muestran los primeros resultados de tomografías eléctricas para delimitar la franja de intrusión salina de las costas de Punta Chame, las coordenadas de los puntos inicial y final de cada tomografía eléctrica se midieron con un GPS Garmin 650T, y se le identificó con un código TE y el número al código se le iba asignando, a medida que se iba realizando dichas medidas; la tabla 4.1 muestra las coordenadas de cada una de las tomografías eléctricas. La figura 4.3, muestra la representación espacial de las tomografías eléctricas en un mapa interactivo de Punta Chame.

Tabla 4.1 Ubicaciones de los perfiles de tomografía eléctrica del área de Punta Chame.

Perfil	X _{INICIAL} (m)	Y _{INICIAL} (m)	X _{FINAL} (m)	Y _{FINAL} (m)	Perfil	X _{INICIAL} (m)	Y _{INICIAL} (m)	X _{FINAL} (m)	Y _{FINAL} (m)
TE01	643088,03	957214,17	643085,43	957133,15	TE12	642354,07	956322,06	642405,81	956258,87
TE02	643285,51	956737,22	643204,95	956730,41	TE13	641766,75	955647,50	641819,10	955590,52
TE03	643243,69	956518,92	643174,32	956534,21	TE14	641529,98	955345,63	641576,21	955301,43
TE04	642760,25	955863,40	642815,20	955817,40	TE15	641354,41	954844,93	641405,74	954895,20
TE05	642523,71	955539,17	642473,89	955590,77	TE16	642874,82	956403,60	642920,88	956459,03
TE06	642232,72	955293,98	642184,91	955346,84	TE17	642189,65	955825,11	642241,75	955874,41
TE07	641743,14	954905,02	641694,69	954960,12	TE18	642270,87	955895,25	642322,33	955945,62
TE08	642815,20	955817,40	642760,25	955863,40	TE19	642058,26	955870,87	641812,80	955372,73
TE09	641686,84	954866,31	641638,58	954919,33	TE20	642323,27	956073,95	641812,80	955372,73
TE10	641595,26	954784,76	641545,46	954837,06	TE21	641803,45	955352,29	641844,31	955398,76
TE11	641461,56	954685,26	641413,49	954738,89					



Figura 4.3 Ubicación espacial de la distribución de las Tomografías Eléctricas en Punta Chame.
(Mapa Interactivo Google Maps)

Para esclarecer los resultados tomográficos, zonificamos el área de captación de datos para realizar una interpretación más eficaz



Figura 4.4 Zonificación de las tomografías Eléctricas en Punta Chame.
(Mapa Interactivo Google Maps)

4.2.1.1 ZONA 1 DE TOMOGRAFÍAS ELÉCTRICAS

La figura 4.5 presenta la ubicación de las inversiones de las tomografías eléctricas de la zona 1, correspondiente a la parte Norte de Punta Chame.

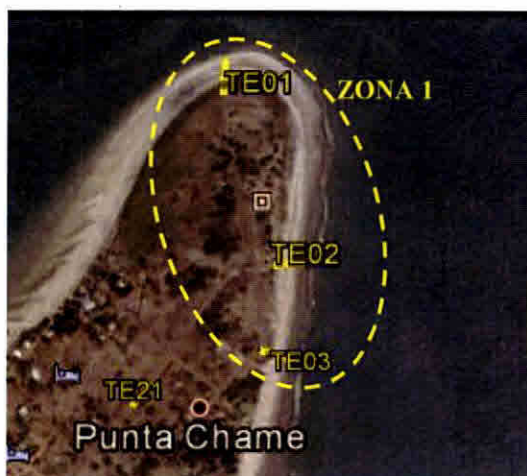


Figura 4.5 Zona 1 de las Tomografías Eléctricas en Punta Chame.

En la figura 4.6 se presenta la inversión de la tomografía eléctrica TE01, en donde en color azul corresponde a una resistividad de $1,0 \Omega \cdot m$, la cual indica una formación que contiene un alto contenido de salinización. Los colores rojos nos indican altas resistividades, correspondientes a arenas secas con un porcentaje de 0,0% a 3,0% de humedad según (Aurelio, 1982). Las discontinuidades en rojo formando picos invertidos representan los antiguos valles de dunas cubiertos por arena y sedimentos, arrastrados por la acción del viento (posiciones 24 m, 31 m, 35 m, 61 m y 67 m de la figura 4.6), la zona de colores verde corresponden a resistividades de $50 \Omega \cdot m$ a $115 \Omega \cdot m$, representa pequeños reservorios de agua fresca a profundidades entre 3,0 m a 4,0 m. En la posición 9,0 m y 3,0 m de profundidad, se presenta un escarpe característico del área.

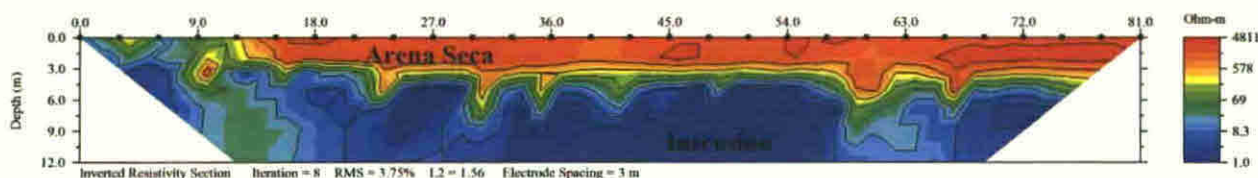


Figura 4.6 Inversión de la Tomografía Eléctrica TE01.

En la figura 4.7 observamos algunas características de parte de la zona 1 de la adquisición de datos de la tomografía TE01.



Figura 4.7 Adquisición de datos de la Tomografía Eléctrica TE01.

En la figura 4.8 se presenta la inversión de la tomografía eléctrica TE02, en donde los colores azules presentan resistividades extremadamente bajas, indicando, posiblemente, zona de intrusión marina; las posiciones comprendidas entre 24 m a 72 m, a una profundidad entre 3,0 m y 6,0 m, son áreas de recarga, la cual disminuye el efecto de intrusión salina; los colores rojos son resistividades altas correspondientes a arenas con un bajo contenido de humedad.

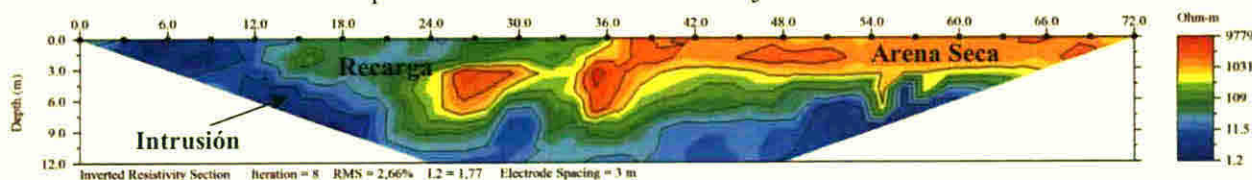


Figura 4.8 Inversión de la Tomografía Eléctrica TE02.

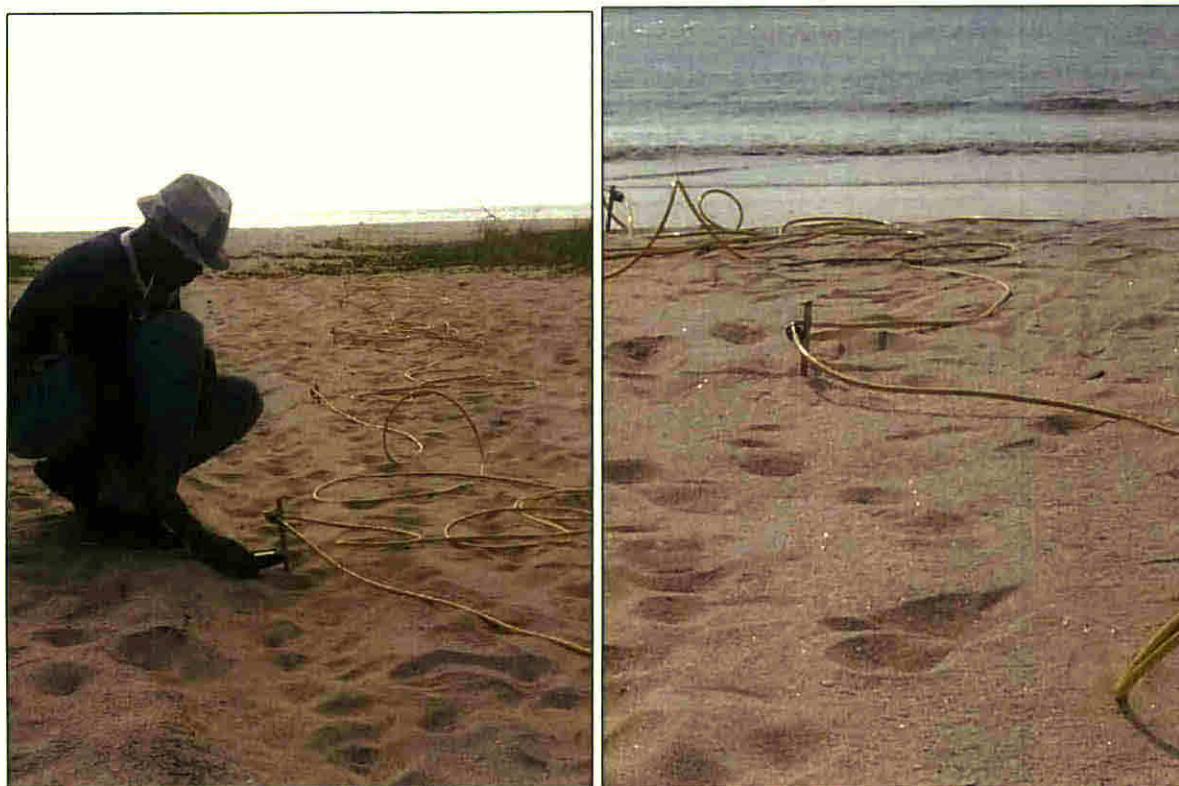


Figura 4.9 Adquisición de datos de la Tomografía Eléctrica TE02.

En la figura 4.10 se presenta la inversión de la tomografía eléctrica TE03, en la cual se nota bien definida la interfaz aguadulce – agua salada en donde los colores azul y celeste corresponden a formación con alto contenido de agua salada, y los colores verde – amarilla corresponde al área de agua fresca; los colores rojizos corresponden a arena seca con un bajo contenido de humedad, en un área de duna primaria.

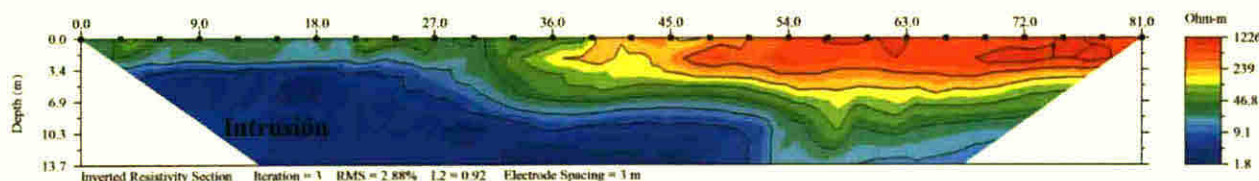


Figura 4.10 Inversión de la Tomografía Eléctrica TE02.

4.2.1.2 ZONA 2 DE TOMOGRAFÍAS ELÉCTRICAS

La figura 4.11 presenta la ubicación de las inversiones de las tomografías eléctricas de la zona 2, correspondiente a la parte Sureste de Punta Chame.



Figura 4.11 Zona 2 de las Tomografías Eléctricas en Punta Chame.

Los resultados de las inversiones de las tomografías eléctricas de la zona 2, correspondiente a la parte Suroeste de Punta Chame. Las inversiones de las tomografías TE04, TE05 y TE06, presentada en la figura 4.12, presentan una gran similitud del área de la zona 2, donde la intrusión salina se encuentra delimitada por resistividades bajas de $1,0 \Omega \cdot m$ a $10 \Omega \cdot m$, con una intrusión más agresiva a medida que se avanza hacia el sureste; y en algunas secciones de esta zona se encuentra bolsones de agua salada. En la posición 60 m y 81 m se aprecia resistividades de $50 \Omega \cdot m$ a $100 \Omega \cdot m$, indicativo de contenido de agua fresca a una profundidad de 3,0 m.

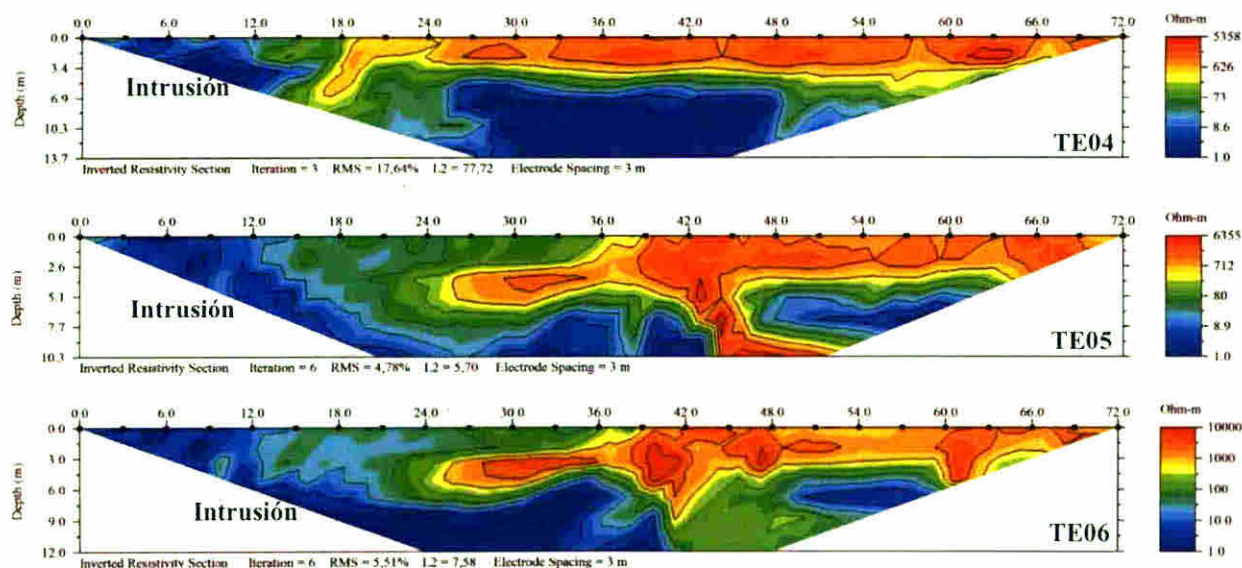


Figura 4.12 Inversión de la Tomografía Eléctrica TE04, TE05 y TE06.

En la figura 4.13 es apreciable el fenómeno de intrusión salina, salvo en la posición 42,0 m, donde se observa una posible barrera que divide la interface de agua salada con la de agua dulce, que podría beneficiar la atenuación de la intrusión salina al acuífero.

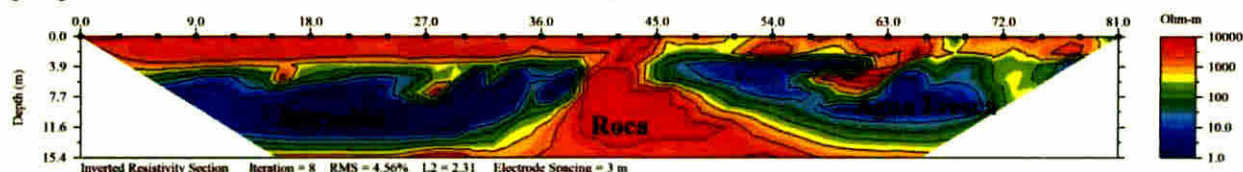


Figura 4.13 Inversión de la Tomografía Eléctrica TE07.

Las inversiones de las tomografías TE08 y TE09, presentada en la figura 4.14 se observa el fenómeno de intrusión salina más agresivo hasta 40,0 m dentro de la costa, salvo en la posición 42,0 m, donde se observa una posible zona de recarga, que podría beneficiar la disminución de la intrusión salina al acuífero, hay que detallar que estas dos tomografías sólo están separadas paralelamente 50,0 m.

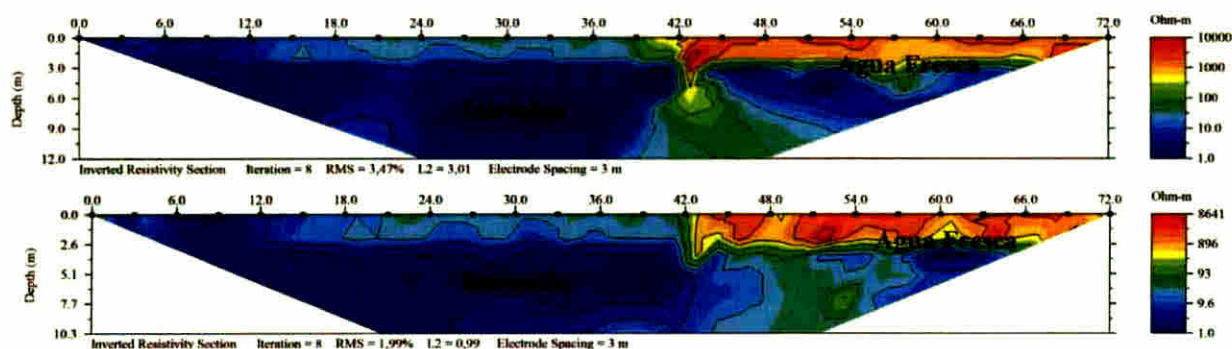


Figura 4.14 Inversión de la Tomografía Eléctrica TE08 y TE09.

Las inversiones de las tomografías TE10 y TE11, presentada en la figura 4.15 se observa el fenómeno de intrusión salina de una manera menos agresiva que las dos tomografías anteriores, ya que en esta parte de la zona 2 los pozos del área no son sobreexplotados. Se observa a los 30,0 m a 33,0 m agua fresca a 3,40 m de profundidad de color amarillo, además de la zona superficial naranja que indica arena seca.

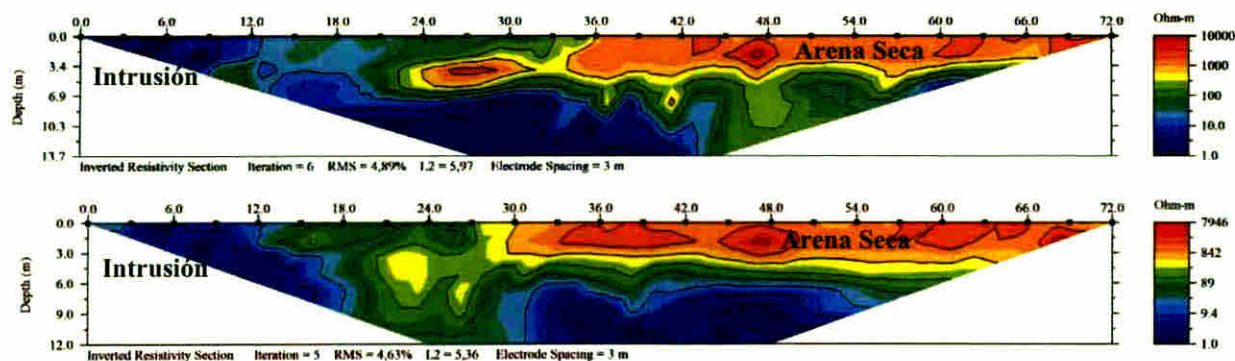


Figura 4.15 Inversión de la Tomografía Eléctrica TE10 y TE11

4.2.1.3 ZONA 3 DE TOMOGRAFÍAS ELÉCTRICAS

La figura 4.14 presenta la ubicación de las inversiones de las tomografías eléctricas de la zona 2, correspondiente a la parte Noroeste de Punta Chame.



Figura 4.16 Zona 3 de las Tomografías Eléctricas en Punta Chame.

La figura 4.16 presenta la inversión de la tomografía eléctrica TE12, la cual presenta área con resistividades de $10000 \Omega \cdot m$ a una profundidad de entre 9,0 m y 12 m, éstas son rocas, también se pueden observar discontinuidades, que podrían ser zona de recarga, que favorecen al acuífero costero, y los colores azulados representan resistividades bajas, que representan a bolsones de agua salada.

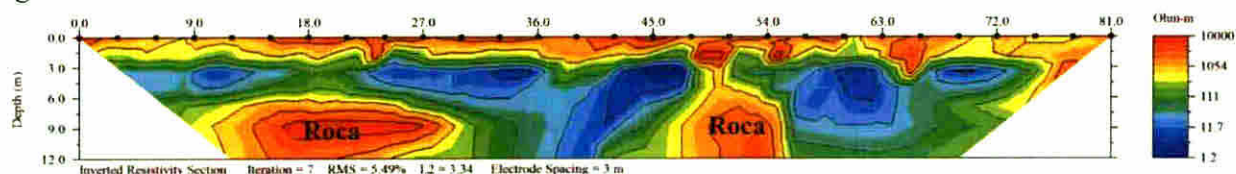


Figura 4.17 Inversión de la Tomografía Eléctrica TE12.



Figura 4.18 Área de adquisición de datos de la tomografía eléctrica TE12, se ve rocas aflorando.

La figura 4.19 presenta la inversión de la tomografía eléctrica TE13, donde a 25,0 m de esta tomografía se encuentra un manglar, el cual evita la penetración de la cuña salina al litoral; en cualquier posición de esta tomografía se puede perforar un pozo (calidad de agua buena). La figura 4.20 muestra el área cerca del vivero y de los pozos comunitarios, donde la calidad de agua es muy buena, y los valores de la resistividad corroboran dicha característica.

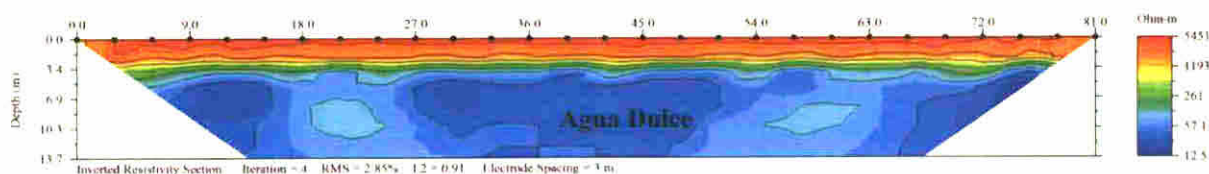


Figura 4.19 Inversión de la Tomografía Eléctrica TE13.



Figura 4.20 Área de adquisición de datos de la tomografía eléctrica TE13.

La figura 4.21 presenta la inversión de la tomografía eléctrica TE14, presenta un área de discontinuidad donde se encuentra dos zonas de recarga de agua para el acuífero, en esta área no hay riesgo de contaminación por intrusión salina. El color rojizo indica rocas predominantes de la zona, mientras que el color azulado indica el agua fresca del área.

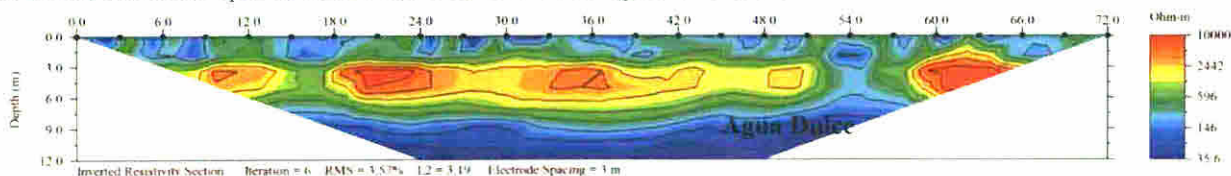


Figura 4.21 Inversión de la Tomografía Eléctrica TE14.

4.2.1.4 ZONA 4 DE TOMOGRAFÍAS ELÉCTRICAS

La figura 4.22 presenta los resultados de las inversiones de las tomografías eléctricas de la zona 4, correspondiente a la zona Central de Punta Chame.



Figura 4.22 Zona 4 de las Tomografías Eléctricas en Punta Chame.

Las inversiones de las tomografías TE15, TE16 y TE21, presentada en la figura 4.23, nos presentan problemas serios de salinización, las posiciones donde se presentan discontinuidades son posibles zonas de recarga, las cuales hay que proteger. Aquí los pozos no pueden excederse de 6,0 m de profundidad.

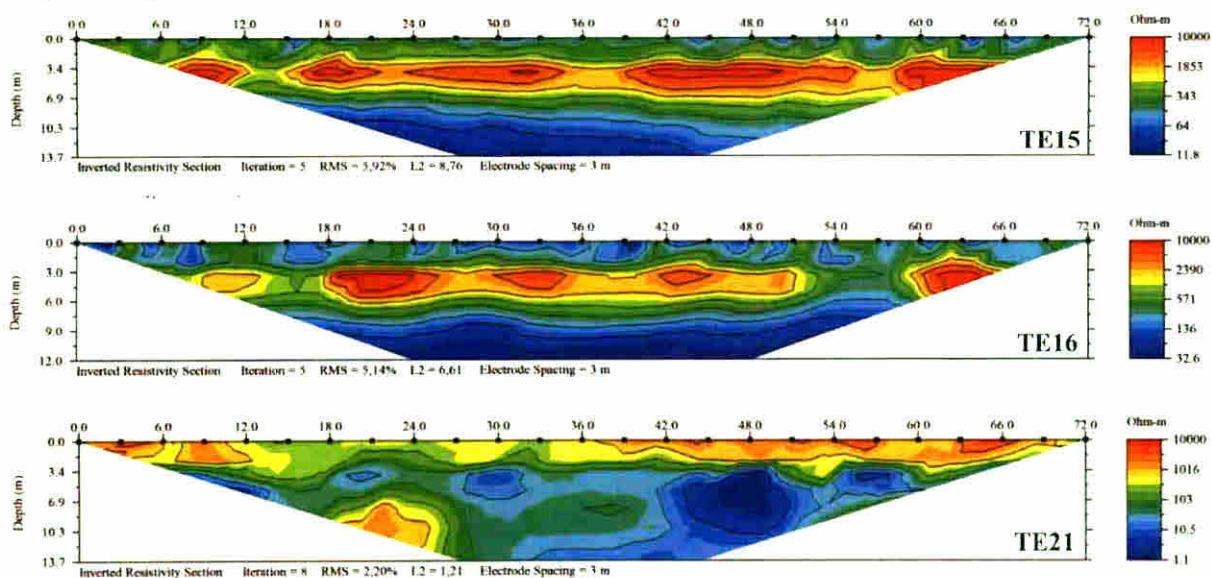


Figura 4.23 Inversión de la Tomografía Eléctrica TE15, TE16 y TE21.

La inversión de la tomografía TE17 se presenta en la figura 4.24, el cual se observa dos bolsones de agua salada a una profundidad de 4,0 m a 14 m de color azul, aquí puede haber riesgo de extraer agua salada. Esta inversión se encuentra paralelo al pozo PCH06, que corrobora el agua fresca a una profundidad de 3,0 m a 4,0 m a los 30,0 m, con un color azulado – verdoso.

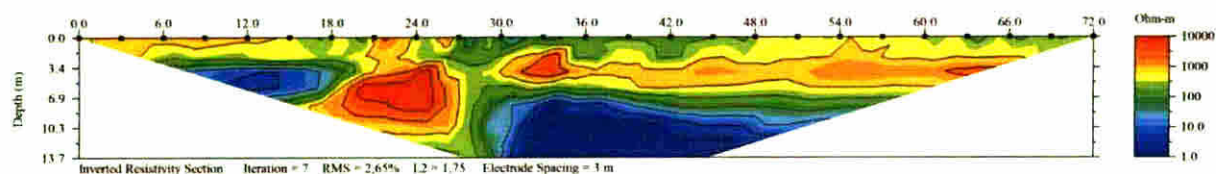


Figura 4.24 Inversión de la Tomografía Eléctrica TE17.

Las inversiones de las tomografías TE19 y TE20, presentada en la figura 4.25, a las posiciones de 54 m y 72 m, respectivamente, podría existir área de recarga del acuífero, se intentó llegar al basamento, pero no se logró. Estas dos tomografías fueron realizadas para localizar posible zona de deformación y se realizaron los pozos PH07 y PH08, los cuales resultaron buenos. La figura 4.26 muestra las características en la adquisición de datos de estas dos tomografías.

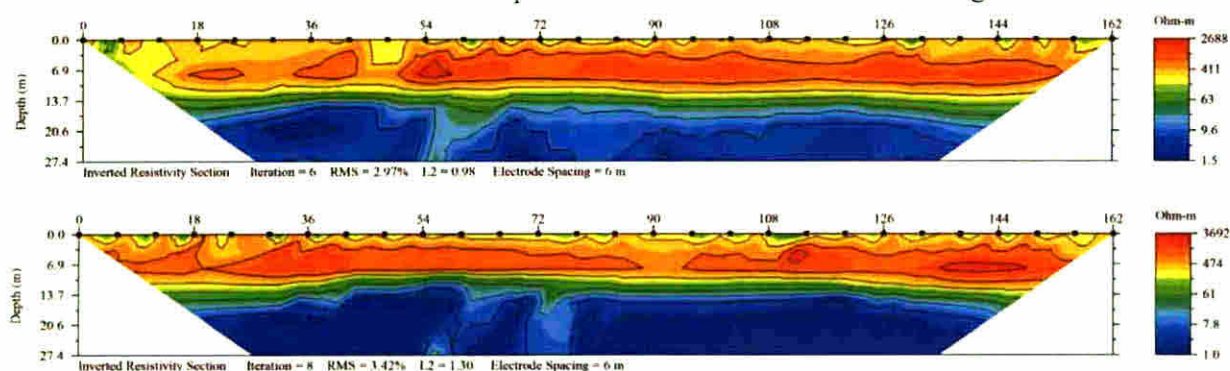


Figura 4.25 Inversión de la Tomografía Eléctrica TE19 y TE20.



Figura 4.26 Área de adquisición de datos de la tomografía eléctrica TE19 y TE20.

La figura 4.27 presenta la inversión de la tomografía eléctrica TE18, el cual muestra la discontinuidad en la posiciones 18 m, 38 m, 33 m, 48 m y 57 m, entre 4,0 m a 5,5 m de profundidad; las cuales son áreas de posible recarga de acuífero. Las zonas azuladas son resistividades bajas que indican muy poca salinidad, el cual indica que los pozos de esta zona deben explotarse con mucho cuidado.

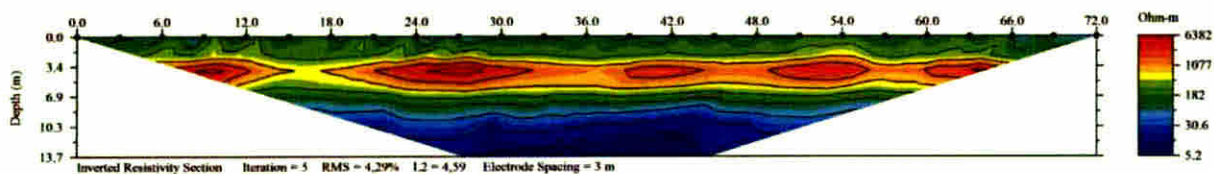


Figura 4.27 Área de adquisición de datos de la Tomografía Eléctrica TE18.

4.3 RESULTADOS HIDROQUÍMICOS

Para establecer una red o puntos de muestreo, para determinar las propiedades físicas y la composición química del agua, se realizó previamente un inventario de captaciones de aguas subterráneas en la primera fase de campo (esta parte se realiza para reforzar y corroborar los resultados geofísicos). En este inventario se identificaron la gran mayoría de los pozos existentes del área de estudio que son para uso doméstico, y un número más reducido de pozos para uso de abastecimiento de agua para aquellas personas que no cuentan con aguas en sus casas. A cada pozo se le midió sus coordenadas con un GPS, Garmin Montana 650T y se le identificó con un código Pch y el número al código se le iba asignando a medida que se identificaron los pozos, por lo que no existe un orden, en la tabla 4.2 se encuentra dichas coordenadas.

Tabla 4.2 Ubicaciones de los pozos del área de Punta Chame

Nombre	X	Y
Pch01	641673,71	955008,04
Pch02	641695,67	955023,60
Pch03	641590,66	955159,26
Pch04	641858,12	955146,89
Pch05	641877,09	955395,77
Pch06	642307,98	955869,42
Pch07	642091,07	955902,97
Pch08	642294,14	956055,15
Pch09	641829,29	955539,37
Pch10	641467,10	954924,41
Pch11	642983,64	956521,95
Pch12	643077,51	956423,85
Pch13	643103,72	956484,76
Pch14	642906,16	956653,28
Pch15	642382,61	956251,19
Pch16	642679,44	956014,44
Pch17	642126,88	955401,04
Pch18	642346,30	955603,04

Tabla 4.3 Análisis de los cationes de las muestras de agua de los pozos de Punta Chame.

Nombre	Ca ²⁺ (mg/L)	Na ⁺ (mg/L)	Mg ⁺ (mg/L)	K ⁺ (mg/L)
Pch01	68	22	21	7,0
Pch02	59	25	14	7,7
Pch03	27	20	7,3	11
Pch04	40	16	10	6,7
Pch05	48	19	9,2	10
Pch06	40	13	10	4,8
Pch07	41	16	7,7	9,0
Pch08	39	18	7,4	4,0
Pch09	40	19	6,4	8,6
Pch10	26	26	12	15
Pch11	54	12	14	3,4
Pch12	67	20	12	4,3
Pch13	62	23	17	7,6
Pch14	47	15	7,9	4,8
Pch15	34	15	8,7	8,2
Pch16	53	27	18	8,4
Pch17	40	12	6,3	2,6
Pch18	59	33	12	8,5

Tabla 4.4 Análisis de los aniones de las muestras de agua de los pozos de Punta Chame.

Nombre	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)	Br ⁻ (mg/L)	NO ₂ ⁻ (mg/L)	HCO ₃ ⁻ (mg/L)	Si (mg/L)
Pch01	69	51	21	0,50	0,003	138	33
Pch02	44	36	45	0,50	0,021	124	34
Pch03	24	37	34	0,40	0,022	62	29
Pch04	17	42	20	0,40	0,022	89	43
Pch05	16	51	27	0,50	0,020	99	37
Pch06	12	37	15	0,30	0,020	89	40
Pch07	25	41	19	0,40	0,021	73	50
Pch08	35	52	19	0,50	0,023	71	51
Pch09	17	38	9,1	0,40	0,020	89	46
Pch10	22	37	24	0,40	0,030	106	40
Pch11	16	45	16	0,40	0,072	118	34
Pch12	28	121	16	0,90	0,027	123	29
Pch13	32	103	20	2,0	0,111	103	31
Pch14	15	59	25	0,80	0,041	77	39
Pch15	6	54	3,2	0,60	0,129	78	53
Pch16	8	79	14	1,8	0,020	137	29
Pch17	6	59	4,0	1,7	0,050	72	35
Pch18	30	81	15	5,3	0,021	131	28

Tabla 4.5 Análisis de los físicos de las muestras de agua de los pozos de Punta Chame.

Nombre	pH	CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Turbiedad (ntu)
Pch01	8,33	613	0,07
Pch02	8,03	648	0,17
Pch03	8,04	385	0,12
Pch04	7,67	421	0,10
Pch05	7,66	463	0,16
Pch06	7,63	380	0,17
Pch07	7,69	380	0,16
Pch08	7,59	381	0,20
Pch09	7,55	391	0,31
Pch10	8,59	458	0,14
Pch11	8,11	480	0,03
Pch12	7,98	567	0,08
Pch13	7,92	690	0,09
Pch14	7,88	389	0,05
Pch15	8,09	295	0,07
Pch16	8,04	624	0,12
Pch17	7,95	621	0,10
Pch18	7,85	648	0,05

4.4.1 DIAGRAMAS LOGARÍTMICOS VERTICALES SCHOELLER-BERKALOFF

Los análisis de las 18 muestras de aguas han sido representados mediante diagramas logarítmicos verticales Schoeller-Berkaloff (Figura 4.29), todo esto con la ayuda del programa de AquaChem versión 4.0, diseñado por Waterloo Hydrogeologic.

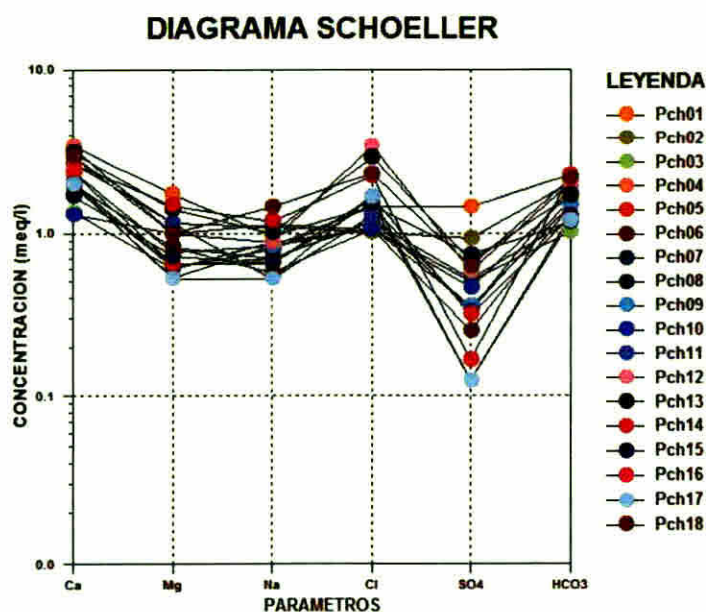


Figura 4.29 Diagrama de Schoeller de las muestras de aguas de los pozos de Punta Chame.

Los resultados del Diagrama de Schoeller-Berkaloff, nos indica que las aguas subterráneas presentan dos tipos de aguas predominantes las cloruradas y las bicarbonatadas. Indican además que las mayores concentraciones para los cationes el Ca, Mg y Na, mientras que para los aniones el HCO_3^- , el Cl^- y SO_4^{2-} .

4.4.2 DIAGRAMA DE PIPER

En la Figura 4.30, se muestran la composición química de las aguas subterráneas representada en un diagrama de Piper. Aquí se muestra todo el conjunto de datos obtenido de los reportes de análisis químicos obtenidos de laboratorio. Haciendo una observación del conjunto de todos los datos de las aguas subterráneas se evidencian dos tipos de agua y una tercera que corresponde a agua de mezcla.

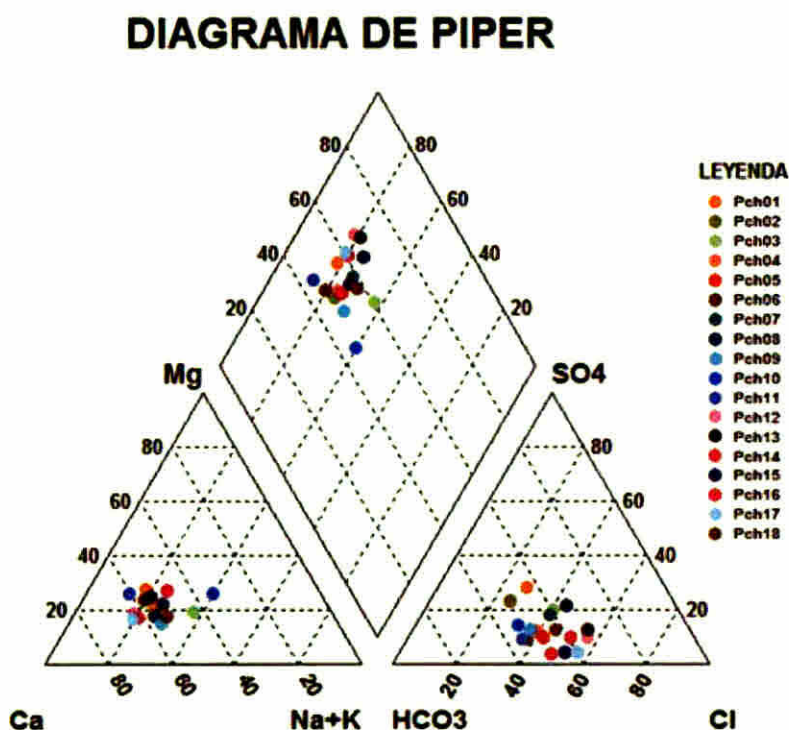


Figura 4.30 Diagrama de Piper de las muestras de aguas de los pozos de Punta Chame.

Para una mejor interpretación de los resultados, se separamos los datos de los pozos en tres secciones: Los pozos de la costa de la parte superior, los pozos de la parte central y los pozos de la costa inferior de Punta Chame. La figura 4.31 muestra los resultados del Diagrama de Piper, para los pozos de la parte superior de la costa de Punta Chame

Las facies catiónicas cartográficas que presentan las aguas de los pozos de la parte superior de la costa de Punta Chame son cálcica-sódicas, para las facies aniónicas su cartografía presente en el agua son cloruradas-sulfatadas, estas facies reflejan los efectos de los procesos químicos en el medio ambiente litológico y los patrones de flujo de agua subterránea que contiene (Back, 1961).

DIAGRAMA DE PIPER

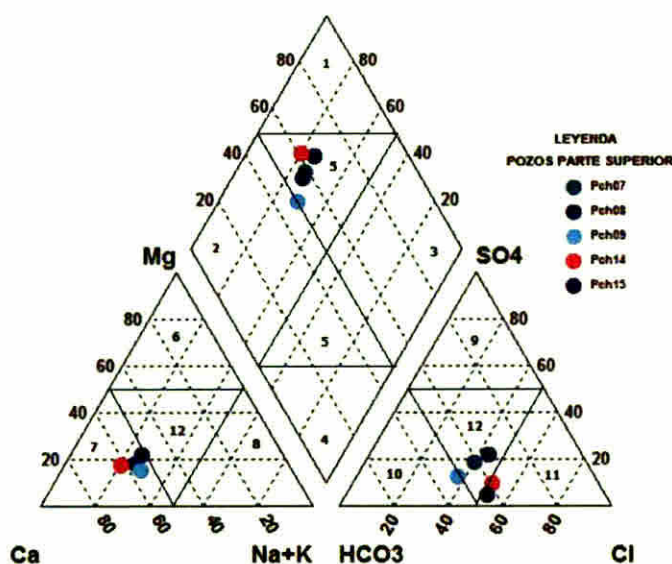


Figura 4.31 Diagrama de Piper de los pozos de la costa superior de la costa de Punta Chame.

La figura 4.32 nos muestra el Diagrama de Piper de los pozos para la zona central de Punta Chame, estas aguas siguen el mismo patrón de la cartografía catiónica que las aguas de los pozos que se encuentran en la parte superior de la costa de Punta Chame siendo la facie cálcica-sódica, en cuanto a la facie aniónica, su cartografía aniónica presenta una transición de bicarbonatada-clorurada-sulfatada a clorurada-sulfatada- bicarbonatada, por otro lado los pozos Pch 03 y Pch 05 presenta una agua de mezcla del agua meteórica con agua de mar, producto del aporte de aerosol marino en agua de lluvia.

DIAGRAMA DE PIPER

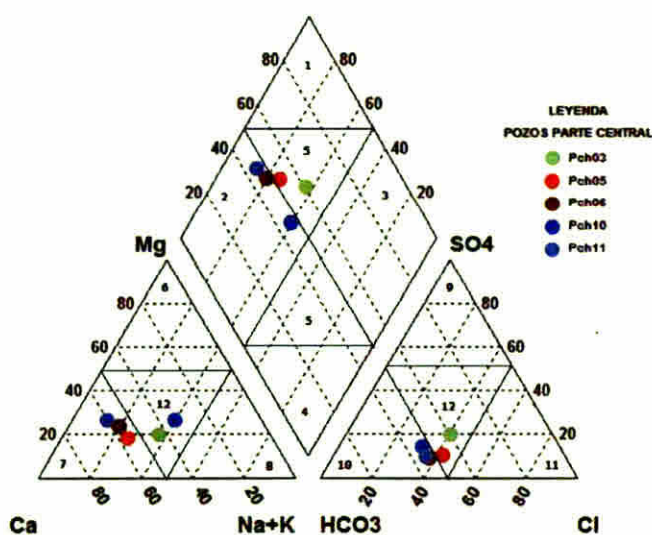


Figura 4.32 Diagrama de Piper de los pozos de la zona central de Punta Chame.

Los pozos de la zona inferior de la costa de Punta Chame, son representados en el Diagrama de Piper en la figura 4.33, en ella se representa la posible representación cartográfica de la evolución de los procesos químicos en el medio ambiente litológico, producto del flujo de agua

subterránea causado por una sobre explotación. La facie catiónica presente estas aguas corresponden a las sódicas-cálcicas, mientras que para las aniónicas presenta una facie clorurada-sulfatada-bicarbonatada, estas agua son las que presenta una mayor intrusión marina debido al descontrol de la explotación de los pozos existentes en esta zona.

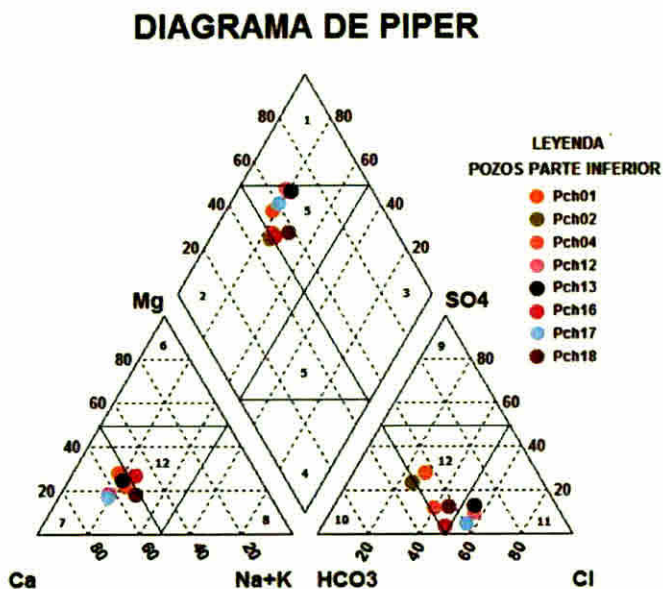


Figura 4.33 Diagrama de Piper de los pozos de la zona inferior de Punta Chame.

4.4.3 DIAGRAMAS DE STIFF

En la Figura 4.34 se puede apreciar la distribución espacial de las aguas identificadas en la zona estudiada, según los patrones encontrados. En los diagramas de Stiff se puede observar el predominio de los aniones bicarbonato y cloruro, así como los aniones de calcio y magnesio. El anión predominante en las cercanías de la costa es el cloruro y en la zona central de Punta Chame es el bicarbonato, esto indica la presencia de distintos tipos de agua en Punta Chame, coincidiendo con los resultados reportados en los diagramas anteriores.

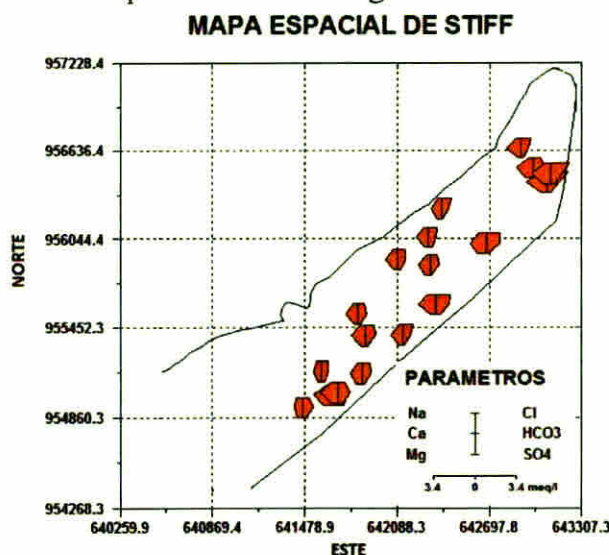
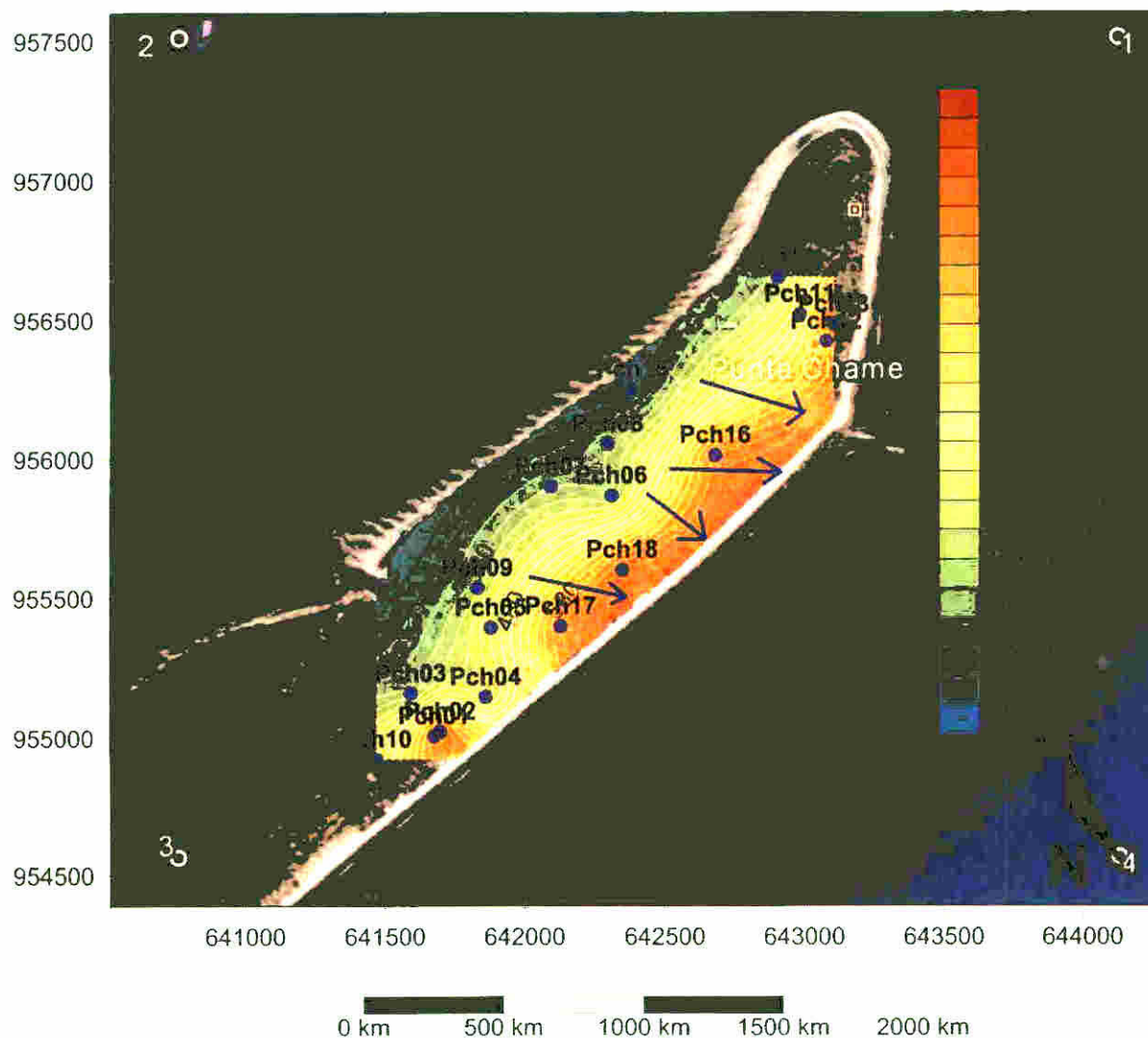


Figura 4.34 Distribución espacial de las aguas subterráneas de Punta Chame con la ayuda del diagrama de Stiff.

4.4.4 MAPAS DE ISOCONCENTRACIONES

4.4.4.1 MAPAS DE ISOCONCENTRACIÓN DE CONDUCTIVIDAD

La isoconcentración de conductividad espacial está representada en la figura 4.35 en este mapa se puede trazar la dirección de flujo de agua subterránea, las cuales están indicadas en las flechas azules, los mayores valores de las conductividad se encuentran en la costa inferior de Punta Chame, este aumento se debe a que en esta zona existe una mayor explotación de agua subterránea, es necesario prestar atención a este comportamiento porque es un indicativo del desplazamiento de la cuña salina.

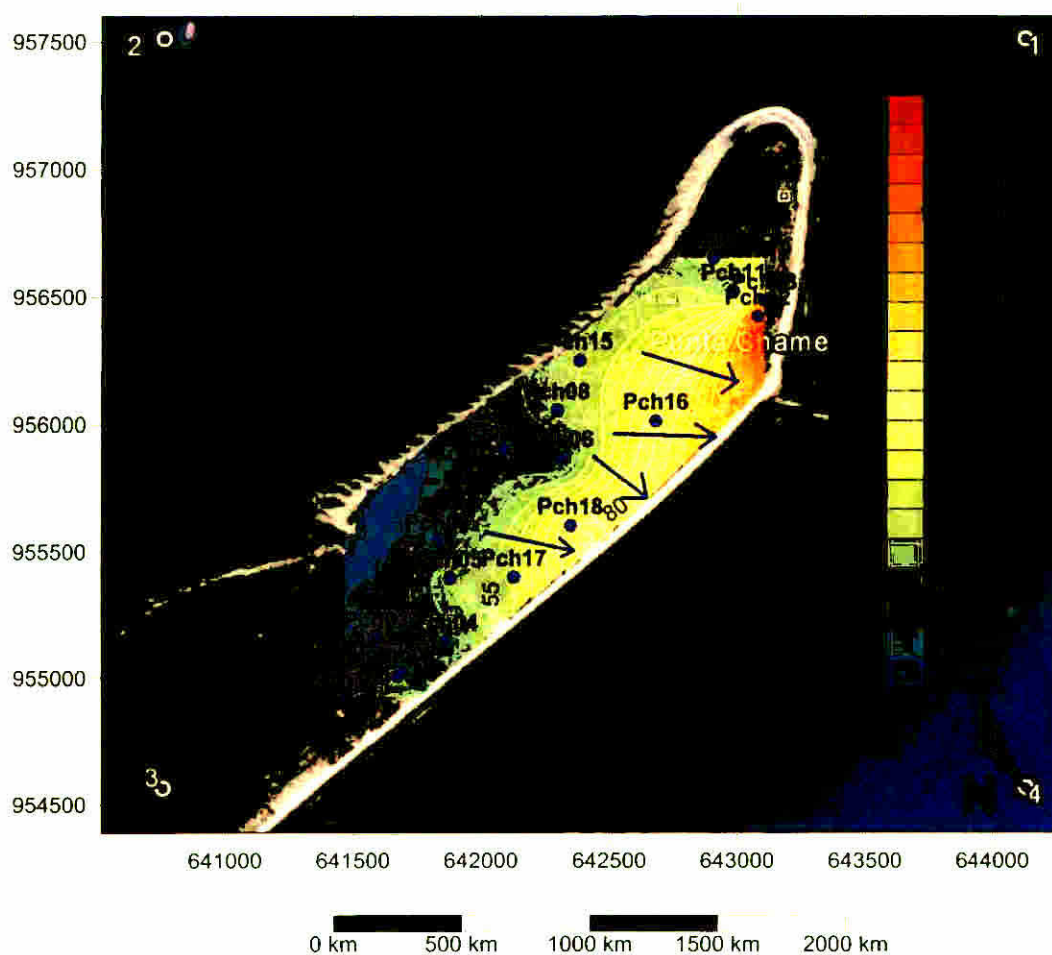


Proyección Universal Transverse Mercator
Elipsoide Clarke 1866
Datum WGS84-Central
Zona Norte 17

Figura 4.35 Mapas de isoconcentración de conductividad.

4.4.4.2 MAPAS DE ISOCONCENTRACIÓN DE CLORURO

Para una mejor representación espacial de la distribución de los iones predominante se confecciono con la ayuda de el programa Surfer versión 10, los mapas de isoconcentraciones. La figura 4.36, no muestra el mapa de isoconcentración de cloruro, como puede apreciar las flechas en azul nos indica la dirección de flujo de las agua subterranea, tomando en consideración al cloruro como un trazador poco reactivo durante su recorrido en las aguas subterranea. En parte de la costa (superior) Norte del Este hasta la parte Sur del Oste de la costa inferior de Punta Chame en donde la intensidad del rojo prebalece, se puede establecer el indicio del fenomeno de intrusión salina, lo que habria que prestar más atención a la explotación de estos pozos que se encuentran en la cercanía de la costa ya que estan estrayendo más agua que la recarga en la zona le permite. Un control de medida de cloruro en función del tiempo seria una forma de tener un control en la explotación de las agua subterranea, un aumento de cloruro indicaría problema de intrusión salina.



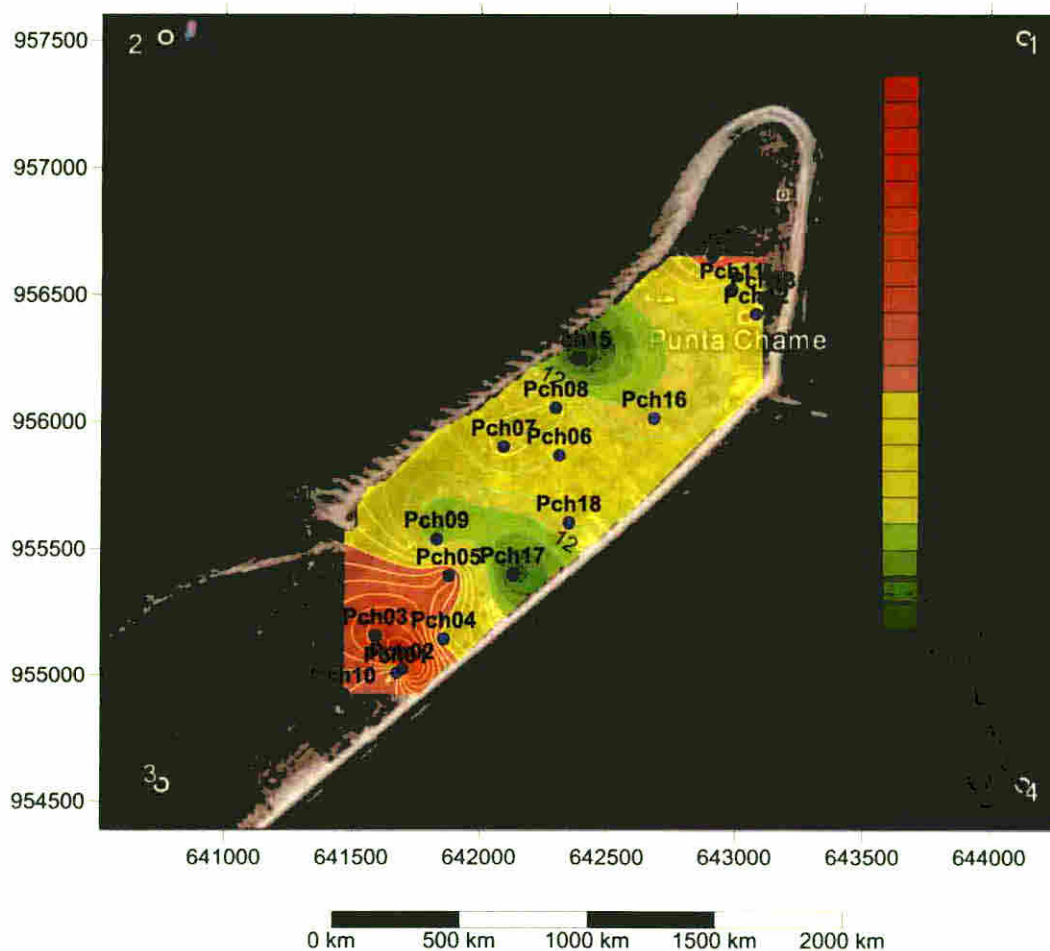
Proyección Universal Transverse Mercator
Elipsoide Clarke 1866
Datum WGS84-Central
Zona Norte 17

Figura 4.36 Mapas de isoconcentración de cloruro.

4.4.4.3 MAPAS DE ISOCONCENTRACIÓN DE NITRATO

Los mapas de isolíneas de concentración de nitrato en el acuífero libre de Punta Chame, se elaboró a partir de las concentraciones de nitrato obtenidas en cada punto muestreado de los pozos existente, trazando isolíneas por interpolación Kriging. En los mapas de isolíneas de nitrato se represento la distribución del contenido como mg/L de NO_3 .

En la figura 4.37 se muestran el mapa de distribución del contenido en nitrato en el acuífero libre de Punta Chame. Los colores semaforos nos indica los lugares más propenso a contaminación el color rojo los lugares donde los nitratos ya alcanzaron los niveles permisibles y estan a punto de alcanzarlo, mientras que el amarillo indica que hay que tomar medidas de precaución, el verde indica que los niveles estan en los permisibles y no existen riesgo. Los colores marcados en rojo o proximo al rojo son lugares en donde existe cumulos de casas habitadas, por lo que existen tanques septicos.



Proyección Universal Transverse Mercator
Elipsoide Clarke 1866
Datum WGS84-Central
Zona Norte 17

Figura 4.37 Mapas de isoconcentración de nitrato.

De los resultados hidroquímicos de la concentración de nitrato se realizó el mapa de riesgo (figura 4.38), se establecieron tres zonas: la zona viable identificada con el color verde en rangos comprendidos para mayores que 2 mg/L de NO_3 y menores que 16 mg/L de NO_3 , la zona de precaución identificada con el color amarillo comprendidas para valores mayores que 16 mg/L de NO_3 y menores que 30 mg/L de NO_3 y la zona de riesgo identificada con el color rojo, comprendidas para valores mayores que 30 mg/L de NO_3 .

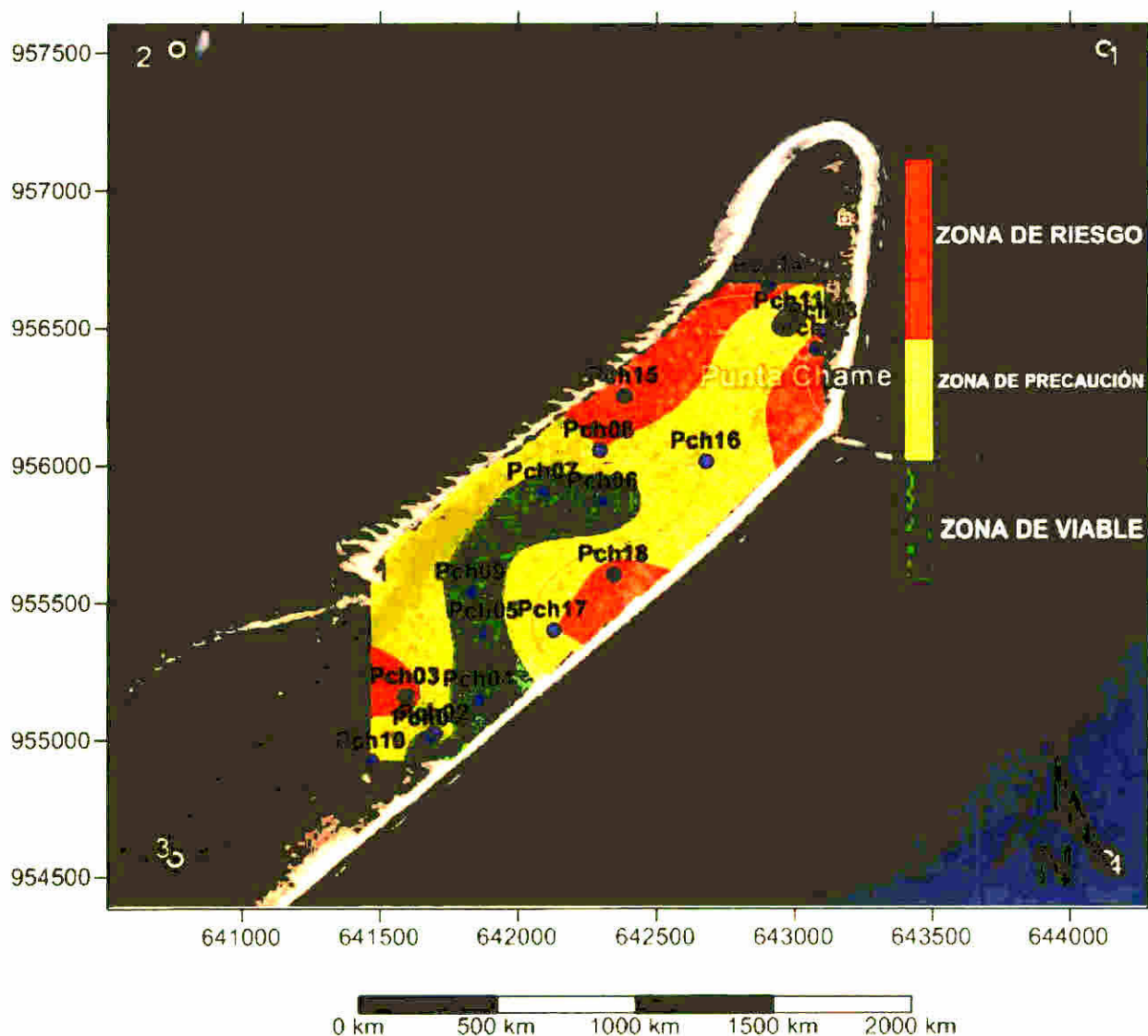


Figura 4.38 Mapas espacial de pozos con alto riesgo de contaminación por intrusión salina.

La figura 4.39 muestra un gráfico de isoresistividad a 3.0 m de profundidad. Para valores menores de $10 \Omega \cdot \text{m}$, identificadas con el color azul indicando zonas de intrusión salina, para valores de resistividades mayores de $20 \Omega \cdot \text{m}$ y menores que $200 \Omega \cdot \text{m}$ identificadas con el color amarillo, indicando una zona de precaución para perforar y los valores de resistividades mayores de $200 \Omega \cdot \text{m}$ a $300 \Omega \cdot \text{m}$, identificadas con el color verde, son zonas viables donde se puede perforar.

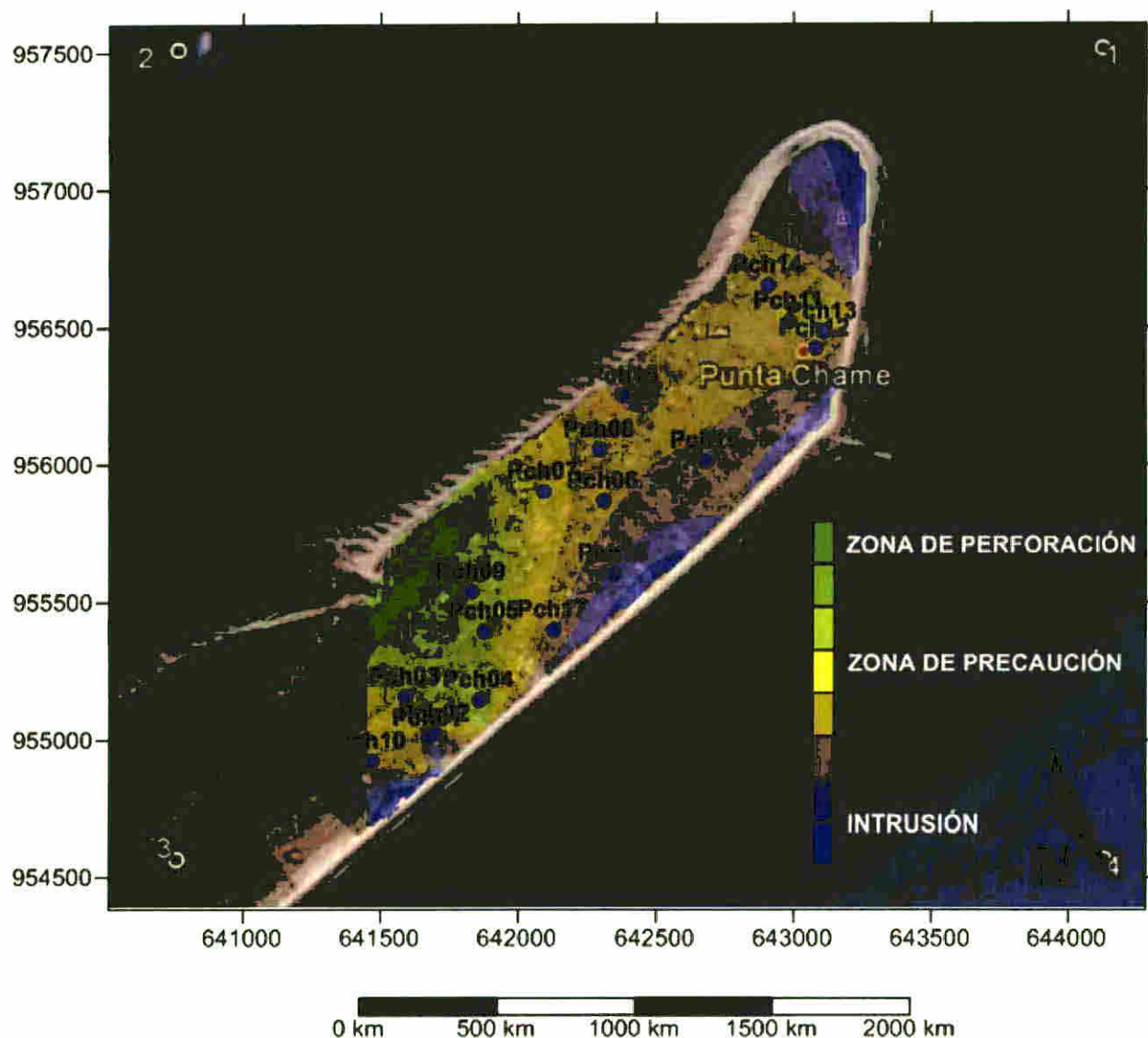


Figura 4.39 Mapas de isoresistividad a una profundidad de 3,0 m.

Al establecer una comparación el mapa de riesgo de nitrato de la figura 4.38 y el mapa de isoresistividad a 3 m de profundidad de la figura 4.39, se puede observar que las zona de perforación esta en la zona viable y parte de la de precaución, indicandonos que ambas herramientas nos proporciona resultados parecidos y que pueden ser utilizadas para una mejor gestión del recurso hídrico.

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

El fenómeno de intrusión marina presente en el acuífero costero de Punta Chame genera una variedad de facies hidrogeoquímicas que revelan la influencia de la mezcla de aguas de diferente naturaleza y de los fenómenos modificadores producto de la interacción del agua salina de la zona de mezcla y el material acuífero del acuífero libre.

El diagrama de Piper ha permitido identificar los procesos hidrogeoquímicos de las aguas subterráneas: las muestras que corresponden a agua dulce, agua de mezcla y agua salina. Las facies catiónicas cartográficas que presentan las aguas de los pozos de la parte superior de la costa de Punta Chame son calcáreas sódicas; para las facies aniónicas la cartografía presente en el agua son cloruradas sulfatadas. Estas facies reflejan los efectos de los procesos químicos en el medio ambiente litológico y los patrones de flujo de agua subterránea que contiene los pozos. Para la zona central de Punta Chame, estas aguas siguen el mismo patrón de la cartografía catiónica que las aguas de los pozos que se encuentran en la parte superior de la costa de Punta Chame, siendo la facies calcárea sódica. En cuanto a la facies aniónica, su cartografía aniónica presenta una transición de bicarbonatada clorurada sulfatada a clorurada sulfatada bicarbonatada. Por otro lado, los pozos Pch 03 y Pch 05 presentan una agua de mezcla del agua meteorica con agua de mar producto del aporte de aerosol marino en agua de lluvia. Los pozos de la zona inferior de la costa se representa la posible cartografía de la evolución de los procesos químicos en el medio ambiente litológico producto del flujo de mezcla de agua subterránea con agua de mar causado por una sobre explotación. La facies catiónica presente estas aguas corresponden a las sódicas calcáreas, mientras que para las aniónicas presenta una facies clorurada sulfatada bicarbonatada. Estas aguas son las que presentan una mayor intrusión marina debido al descontrol de la explotación de los pozos existentes en esta zona.

El patrón de distribución de los iones principales muestra de composición variación en las muestras de agua subterránea. La tendencia general entre los cationes fue la siguiente: $Ca > Mg > K^+ Na$. Del mismo modo, la de los aniones se muestran en el siguiente orden: $HCO_3^- > Cl^- > SO_4^{2-}$.

Los mapas de isoconcentraciones de conductividad y cloruros mostraron las zonas de alto riesgo de contaminación por intrusión salina debido a la sobre explotación de los pozos tal como están indicado en la zona 1, zona 2 y zona 3 de las tomografías eléctricas.

Las tomografías eléctricas permitieron la delimitación del acuífero de agua dulce (resistivas) en relación a las formaciones subyacentes (conductivas) arenosa con alto contenido de agua salada.

El contraste de la resistividad eléctrica observada entre la zona no saturada (altas resistividades), acuífero de agua dulce (resistividades medias) y formaciones con arena y agua salina o salobre (resistividades muy bajas) hace que las tomografías eléctricas y la metodología planteada sean adecuadas para el monitoreo del sistema acuífero costero. Los espesores estimados en las

tomografías eléctricas están en correspondencia con los valores medidos en las perforaciones realizadas

Se reconoce con precisión la presencia e interacción agua dulce con el agua salina en las zonas 1 zona 2 y zona 3 que se encuentran en la cercanía de la costas asociada a la dinámica costera y a la sobre explotación de las aguas subterráneas Parte de la zona 3 y la zona 4 zona donde se puede explotar el recurso de una manera sostenible evitando grandes caudales

En las zonas 1 zona 2 y zona 3 se detectó la relación con el agua salobre como la presencia de bancos de arena que constituyen reservorios restringidos de agua dulce

5 2 RECOMENDACIONES

Las recomendaciones sugeridas van encaminada a una serie de actuaciones tendientes a dar alternativas de solución a los problemas de intrusión marina partiendo del hecho de que se trata de un problema multiple y complejo y la aplicacion de medidas preventivas será mucho mas eficaz que las correctivas entre estas tenemos

- Profundizar en los estudios que permitan una mayor acotación de los diferentes componentes del balance hidraulico y un mejor conocimiento de la geometria interna de los acuíferos y de los mecanismos que provocan en cada caso concreto el avance de la intrusión
- Limitar o redistribuir espacialmente las captaciones de agua de acuerdo con los resultados obtenidos de esta investigación tanto en aquellas zonas que presentan indicios de riesgo en donde puede llegar a producirse la intrusión salina
- Ejercer una labor de vigilancia y control permanente sobre los volumenes extraídos en las captaciones existentes y en las de realizaciones futuras
- Colocar dos estaciones meteorológicas para el estudio de balance hídrico
- Colector de pluviómetros por los menos tres en toda el área
- Establecer al menos unos 10 pozos de observación para establecer una red piezométrica
- Colocar cinco pozos de observación cerca de las aéreas pobladas para diferentes profundidades de muestreo y así lograr monitorear los niveles de nitratos como agua de mezcla

BIBLIOGRAFÍA

- Addicted04. (12 de Julio de 2012). *Wikipedia.org*. Recuperado el 7 de Enero de 2013, de http://commons.wikimedia.org/wiki/File:PAN_orthographic.svg
- Aurelio, J. (1982). *Sistema de Aterramiento* (Cuarta ed.). Sao Paulo, Brasil: Enrico.
- Ambiente, A. N. (25 de 01 de 2012). Mapa Geológico de Panamá. Panamá, Panamá, Panamá.
- ASTM. 1994. Standard Practice for Design and Installation of Ground Water Monitoring Wells in Aquifers. American Society for Testing and Material Standards. Philadelphia, USA.
- Ayala, L. (4 de agosto de 2010). *Explorock* . Recuperado el 20 de Diciembre de 2012, de <http://explorock.wordpress.com/2010/08/04/depositos-sedimentarios/>
- Back, W. (1961) Techniques for mapping of hydrochemical facies. US Geol Surv Prof Pap 424-D, pp 380–382
- Balia, R., Gavaudo, E., Ardau, F. and Ghiglieri, G., Case history: geophysical approach to the environmental study of a coastal plain, *Geophysics*, Vol.68, pp. 1446–1459. 2003.
- Bauer, P., Supper, R., Zimmermann, S. and Kinzelbach, W., Geoelectrical imaging of groundwater salinization in the Okavango Delta, Botswana, *Journal of Applied Geophysics*, Vol.60, pp. 126–141. 2006.
- Bolivar, F. (2008). *Determinación del Mapa de Vulnerabilidad del Acuífero de Penonomé, mediante el empleo de método GOD con la ayuda de SIG*. Panamá.
- Burke, G. (2007). *Detección del nivel freático de la ciudad del árbol por el método de tomografía eléctrica*. Panamá: Univerdsidad de Panamá.
- Canales Escobar , P. A., Gómez Miranda, R., & Funes, J. C. (2009). Propuesta para el desarrollo estrategico de la proteccion de aguas subterraneas y caracterizacion de acuíferos de la ciudad de san miguel. En i. F. Aguirre, *propuesta para el desarrollo estrategico de la proteccion de aguas subterraneas y caracterizacion de acuíferos de la ciudad de San Miguel* (pág. 41). El Salvador: Universidad de Oriente.
- Censo, I. N., & Contraloría General de la República de Panamá. (2010). INEC Panamá. Panamá, Panamá, Panamá.
- Custodio, E., & Llamas, M. (1983). *Hidrología Subterránea* (Segunda ed.). Barcelona, España: Ediciones Omega S. A.
- Dalton, M.G., and Upchurch, S.B., 1978, Interpretation of hydro-chemical facies by factor analysis: *Groundwater*, 16(4), p. 228-233
- Demirel, Z., The history and evaluation of saltwater intrusion into a coastal aquifer in Mersin, Turkey, *J. Environ. Manage.*, Vol 70, pp 275–282. 2004
- Dr. Ingeniero Luis Silveira, P. (2012). *Hidráulica de Acuíferos*. 14. Montevideo, Montevideo, Uruguay.

Duque C Calvache M L Pedrera A Martin Rosales W M López Chicano M Combined time domain electromagnetic soundings and gravimetry to determine marine intrusion in a detrital coastal aquifer (Southern Spain) *J Hydrol* Vol 349 pp 536–547 2007

Ebraheem A A M Senosy M M and Dahab K A Geoelectrical and hydrogeochemical studies for delineating ground water contamination due to saltwater intrusion in the Northern part of the Nile Delta Egypt *Ground Water* Vol 35 pp 216–222 2005

Espinoza, C (2005) *Estudio de intrusion salina en acuíferos costeros Sector Costa Quebrada Los Choros IV REGION* Facultad de ciencias Físicas y Matemáticas Ingeniería Civil Chile S I T N 109

ETESA (2009) *Hidrometeorología* Recuperado el 2012 de Mayo de 19 de ETESSA <http://www.hidromet.com.pa/documentos.php?sec=1>

FCIHS (2009) *HIDROGEOLOGIA* (C D Subterránea Ed) Barcelona España

Frohlich R K Barosh P J and Boving T Investigating changes of electrical characteristics of the saturated zone affected by hazardous organic waste *J Appl Geophys* Vol 64 pp 25–36 2008

Freeze R A and Cherry J A 1979 *Groundwater* New Jersey Prentice Hall

Gómez A (20 de enero de 2011) *MeDiario Ambiental* Recuperado el 23 de 09 de 2013 de Intrusión Salina <http://www.iesgrancapitan.org/blog08/?p=1436>

Gómez J C (2009) *Geología geofísica hidrogeoquímica e isótopos como herramientas para definir un modelo conceptual hidrogeológico caso de aplicación acuífero costero del municipio de Turbo* Facultad de minas escuela de geociencias y medio ambiente Medellín universidad nacional de Colombia

Grupo de Actividades Recreativas A d (2012) *Provincia de Panamá* Recuperado el 7 de Enero de 2013 de <http://www.luenticus.org/mapas/panama/panama.html>

Guardia T & MOP Chame Instituto Geógrafo Nacional Panamá

Hem J D 1985 Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water (3d ed) U S Geological Survey Water? Supply Paper 2254

Hill R A 1940 Geochemical patterns in Coachella Valley California American Geophysical Union Trans 21 p 46–49

Hinojosa H R (2010) Seminario de Imágenes de Resistividad *Imágenes de Resistividad* (pág 209) Austin TX USA AGI

Huguet J M (7 de Julio de 2005) *Hidrología Tipos de Acuíferos Maestría de las Américas* Compostela, Santiago España

INEC (2010) *Precipitación pluvial registrada en las estaciones meteorológicas de la República por mes según provincia comarca indígena y estación años 2008 10* Panamá Contraloría Nacional

Johnson T (2007) *Water replenishment district of southern california* Recuperado el 07 de 10 de 2013 de [http //www wrd org/engineering/seawater intrusion los angeles php](http://www.wrd.org/engineering/seawater_intrusion/los_angeles.php)

Koukadaki M A Karatzas G P Papadopoulou M P and Vafidis A Identification of the Saline Zone in a Coastal Aquifer Using Electrical Tomography Data and Simulation *Water Resource Management* Vol 21 pp 1881 1898 2012

Lausanne U d (30 de Noviembre de 2009) *Curso Online de Geofísica* Recuperado el 20 de Noviembre de 2012 de [http //www ig unil ch/cours/geophyse/acc2e htm](http://www.ig.unil.ch/cours/geophyse/acc2e.htm)

Llanuras I d (07 de Octubre de 2005) *Diagramas Hidroquímicos* (Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires) Recuperado el 23 de Septiembre de 2013 de [http //www bdh lapampa gov ar/lapampa/common/themes/azul/help/Diagramas_Hidroqu_micos htm](http://www.bdh.lapampa.gov.ar/lapampa/common/themes/azul/help/Diagramas_Hidroqu_micos.htm)

Loke M H (2001) *Tutorial 2 D and 3 D electrical imaging surveys*

López Hidalgo A A Heng Loke M Fanton G O & Cara Rubi E (11 de Abril de 2006) *TECNICAS PRACTICAS PARA INVESTIGACION DE RESISTIVIDAD EN DOS Y TRES DIMENSIONES (TOMOGRAFIA ELECTRICA 2D y 3D)* Instituto Geofísico Sismológico Ing F S Volponi Facultad de Cs Exactas Físicas y Naturales 36

Mijalov L (1985) *Hidrogeología* Moscu Rusia Mir Moscu

Molina U C (6 de Septiembre de 2010) *La escurridiza estrella diez* (L Prensa Ed) Panama Oeste Panamá Panamá

Panamá S (2005) *SomosPanama.com* Recuperado el 7 de enero de 2013 de [http //www somospanama com/quienes _somos/index php](http://www.somospanama.com/quienes_somos/index.php)

PanamaFace (2008) *panamaface* Recuperado el 19 de Mayo de 2012 de [http //www panamaface com/sp/locality/locality _detail php?idLocality=31](http://www.panamaface.com/sp/locality/locality_detail.php?idLocality=31)

Parraguirre C C (2002) *Sondaje eléctrico para prospección de suelos y determinación de napas subterráneas* (Facultad de Ingeniería ed) Santiago Chile UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE

Petalas C P and Lambrakis N Simulation of intense salinization phenomena in coastal aquifers—the case of the coastal aquifers of Thrace *Journal of Hydrology* Vol 324 pp 51–64 2006

Piper A M 1944 A graphical procedure in the geochemical interpretation of water analysis *American Geophysical Union Trans* v 25 p 914 923

Ponce V (Marzo de 2006) *GROUNDWATER UTILIZATION AND SUSTAINABILITY* Recuperado el 05 de Octubre de 2013 de [http //groundwater sdsu edu/](http://groundwater.sdsu.edu/)

Porres J A Espinosa A B & Avila E (1996) *Localización de aguas subterráneas para abastecimiento mediante prospección geofísica de resistividades acuíferos de interior y costeros* Recuperado el 26 de 01 de 2012 de [www ciccp es/](http://www.ciccp.es/)

- Porres Benito J A Espinosa González A B Avila, E Díez De La Fuente R Ibáñez García S & García Castillo L M (2006) Localización de aguas subterráneas para abastecimiento mediante prospección geofísica de resistividades acuíferos de interior y costeros *EPS* 13
- Quezada R (11 de Septiembre de 2011) Punta Chame se alista para el turismo *La Presa*
- Rerez Ceballos R & Pacheco Avila, J (2004) *Vulnerabilidad del agua subterránea a la contaminación de nitratos en el estado de Yucatan* México
- RockWare (2004) *Piper Diagram Stiff Diagram Durov Plot and Other Water Chemistry Diagram Types in AqQA Software* Recuperado el 2013 de 09 de 2013 de <http://www.rockware.com/product/gallery.php?id=150>
- Roman J S (2 de Abril de 2009) Prospección Geofísica Sondeos Eléctricos Verticales (U d Salamanca, Ed) *www.hidrologia.usal.es* 12
- Salgado J Contreras E & Vizcarra M (2002) *Aplicaciones de la tomografía geoelectrica 2D al estudio del subsuelo* México Universidad Tecnológica de Mixteca
- Salinas P (2009) *MODELO CONCEPTUAL HIDROGEOLOGICO DE LA CUENCA DEL RIO ZARATI* Penonomé Panama Universidad de la Pampa
- Sánchez F (15 de Agosto de 2012) *Medidas Puntuales de la Permeabilidad* Recuperado el 02 de 10 de 2013 de www.hidrologia.usal.es
- Sanchez J (2009) Conceptos Fundamentales de Hidrogeología Salamanca, España Universidad de Salamanca Obtenido de <http://web.usal.es/javisan/hidro>
- Sánchez M R (2008) *Conceptos Basicos de Hidrologia de Acuíferos Subterráneos* Michigan Michigan Tech
- Santos J D (Noviembre de 2012) Prospección Geofísica I Montevideo Montevideo Uruguay
- Schoeller H (1955) Utilite de la notion des exchange de bases pour la comparaison des eaux souterraines France Societe Geologie Comptes rendus Sommaire et Bulletin Serie 5 v 5 po 651 657
- Sinfn A & Gewali L (September de 2010) A Shape Similatory Index for Stiff *International Journal of Applied Environmental Sciences* 5 541
- Stiff H A 1951 The interpretation of chemical water analysis by means of patterns *J Petrol Technol* 3 p 15–16
- Walton W C 1962 Selected analytical methods for well and aquifer evaluation Illinois State Water Survey Bulletin 49
- Wikipedia (21 de 03 de 2012) *Example Stiff Diagram* Recuperado el 23 de 09 de 2013 de http://en.wikipedia.org/wiki/File:Example_Stiff_Diagram.jpg

ANEXOS

ANEXOS A
REPORTES DE ANÁLISIS QUÍMICO DE LAS
MUESTRAS DE PUNTA CHAME

Reporte de Análisis Químico de Laboratorio

POZO	PCH01
LOCALIZACIÓN	Punta Chame
Geología	arena
Tipo de Agua	Ca Mg HCO3 SO4 Cl
Temperatura (C)	27 00
pH	8 33
Conductividad	613 00 uS/cm
Suma de Aniones	5 42 meq/L
Suma de Cationes	6 26 meq/L
Balance	7 18 %
Total de sólidos disueltos	573 95 mg/L
Dureza Total	255 20 mg/l CaCO3
Alcalinidad	113 43 mg/l CaCO3

Composicion del Mejor Ion	mg/l	mmol/l	meq/l
Na	22 48	0 98	0 98
K	7 02	0 180	0 180
Ca	68 17	1 70	3 40
Mg	20 63	0 85	1 70
Cl	50 70	1 43	1 43
SO4	69 29	0 72	1 44
NO3	21 19	0 27	0 27
HCO3	138 30	2 27	2 27

Relaciones Iónicas	Comparación de Agua de Mar			
	mg/l	mmol/l	mg/l	mmol/l
Ca/Mg	3 30	2 00	0 319	0 194
Ca/SO4	0 98	2 36	0 152	0 364
Na/Cl	0 44	0 68	0 556	0 858
Cl/Br	101	229	287	648

Reporte de Análisis Químico de Laboratorio

Nombre ID	PCH02			
Nombre Date				
Localización	Punta Chame			
Geología	arena			
Tipo de Agua	Ca-Mg-Na-HCO3-Cl			
Temperatura (°C)	27,00			
pH	8,03			
Conductividad	648,00	μS/cm		
Suma de Aniones	4,55	meq/L		
Suma de Cationes	5,34	meq/L		
Balance	-8,06	%		
Total Disueltos Sólidos	531,18	mg/L		
Dureza Total	202,25	mg/l CaCO3		
Alcalinidad	101,37	mg/l CaCO3		
Composición del Mejor Ion	mg/l	mmol/l	meq/l	
Na	25,43	1,11	1,11	
K	7,69	0,197	0,197	
Ca	58,69	1,46	2,93	
Mg	13,52	0,56	1,11	
Cl	36,30	1,02	1,02	
SO4	44,12	0,46	0,92	
NO3	44,63	0,57	0,57	
HCO3	123,60	2,03	2,03	
Relaciones Iónicas	Comparación de Agua de Mar			
	mg/l	mmol/l	mg/l	mmol/l
Ca/Mg	4,34	2,63	0,319	0,194
Ca/SO4	1,33	3,19	0,152	0,364
Na/Cl	0,70	1,08	0,556	0,858
Cl/Br	73	164	287	648

Reporte de Análisis Químico de Laboratorio

Nombre ID	PCH03
Nombre Date	
Localización	Punta Chame
Geología	arena
Tipo de Agua	Ca Na Cl HCO ₃
Temperatura (C)	27 00
pH	8 04
Conductividad	385 00 μ S/cm

Suma de Aniones	3 00 meq/L
Suma de Cationes	3 08 meq/L
Balance	1 41 %

Total Disueltos Sólidos	397 58 mg/L
Dureza Total	96 30 mg/l CaCO ₃
Alcalinidad	50 93 mg/l CaCO ₃

Composicion del Mejor Ion	mg/l	mmol/l	meq/l
Na	20 07	0 87	0 87
K	11 17	0 286	0 286
Ca	26 54	0 66	1 32
Mg	7 29	0 30	0 60
Cl	36 80	1 04	1 04
SO ₄	24 29	0 25	0 51
NO ₃	33 56	0 43	0 43
HCO ₃	62 10	1 02	1 02

Relaciones Iónicas	mg/l	mmol/l	mg/l	mmol/l
	Comparación de Agua de Mar			
Ca/Mg	3 64	2 21	0 319	0 194
Ca/SO ₄	1 09	2 62	0 152	0 364
Na/Cl	0 55	0 84	0 556	0 858
Cl/Br	92	207	287	648

Reporte de Análisis Químico de Laboratorio

Nombre ID	PCH04
Nombre Date	
Localización	Punta Chame
Geología	arena
Tipo de Agua	Ca-Mg-HCO ₃ -Cl
Temperatura (°C)	27,00
pH	7,67
Conductividad	421,00 μ S/cm

Suma de Aniones	3,28 meq/L
Suma de Cationes	3,74 meq/L
Balance	-6,58 %

Total Disueltos Sólidos	467,36 mg/L
Dureza Total	143,47 mg/l CaCO ₃
Alcalinidad	73,32 mg/l CaCO ₃

Composición del Mejor Ion	mg/l	mmol/l	meq/l
Na	16,08	0,70	0,70
K	6,74	0,172	0,172
Ca	40,30	1,01	2,01
Mg	10,40	0,43	0,86
Cl	42,20	1,19	1,19
SO ₄	17,02	0,18	0,35
NO ₃	20,43	0,26	0,26
HCO ₃	89,40	1,47	1,47

Relaciones Iónicas	Comparación de Agua de Mar			
	mg/l	mmol/l	mg/l	mmol/l
Ca/Mg	3,88	2,35	0,319	0,194
Ca/SO ₄	2,37	5,67	0,152	0,364
Na/Cl	0,38	0,59	0,556	0,858
Cl/Br	106	238	287	648

Reporte de Análisis Químico de Laboratorio

Nombre ID	PCH05
Nombre Date	
Localización	Punta Chame
Geología	arena
Tipo de Agua	Ca Na HCO3 Cl
Temperatura (C)	27 00
pH	7 66
Conductividad	463 00 $\mu\text{S/cm}$

Suma de Aniones	3 75 meq/L
Suma de Cationes	4 25 meq/L
Balance	6 28 %

Total Disueltos Solidos	574 39 mg/L
Dureza Total	157 44 mg/l CaCO3
Alcalinidad	80 95 mg/l CaCO3

Composición del Mejor Ion	mg/l	mmol/l	meq/l
Na	19 48	0 85	0 85
K	10 09	0 258	0 258
Ca	47 87	1 19	2 39
Mg	9 20	0 38	0 76
Cl	51 10	1 44	1 44
SO4	16 09	0 17	0 34
NO3	27 19	0 35	0 35
HCO3	98 70	1 62	1 62

Relaciones Iónicas	mg/l	mmol/l	mg/l	mmol/l
	Comparacion de Agua de Mar			
Ca/Mg	5 20	3 16	0 319	0 194
Ca/SO4	2 98	7 13	0 152	0 364
Na/Cl	0 38	0 59	0 556	0 858
Cl/Br	102	230	287	648

Reporte de Análisis Químico de Laboratorio

Nombre ID	PCH06
Nombre Date	
Localización	Punta Chame
Geología	arena
Tipo de Agua	Ca Mg HCO3 Cl
Temperatura (°C)	27 00
pH	7 63
Conductividad	380 00 μ S/cm

Suma de Aniones	2 94 meq/L
Suma de Cationes	3 52 meq/L
Balance	8 99 %

Total Disueltos Sólidos	646 34 mg/L
Dureza Total	140 90 mg/l CaCO3
Alcalinidad	72 59 mg/l CaCO3

Composición del Mejor Ion	mg/l	mmol/l	meq/l
Na	13 30	0 58	0 58
K	4 79	0 123	0 123
Ca	39 60	0 99	1 98
Mg	10 20	0 42	0 84
Cl	36 90	1 04	1 04
SO4	11 75	0 12	0 24
NO3	15 34	0 20	0 20
HCO3	88 50	1 45	1 45

Relaciones Iónicas	mg/l	mmol/l	mg/l	mmol/l
	Comparación de Agua de Mar			
Ca/Mg	3 88	2 35	0 319	0 194
Ca/SO4	3 37	8 07	0 152	0 364
Na/Cl	0 36	0 56	0 556	0 858
Cl/Br	123	277	287	648

Reporte de Analisis Quimico de Laboratorio

Nombre ID	PCH07
Nombre Date	
Localización	Punta Chame
Geologia	arena
Tipo de Agua	Ca Na HCO3 Cl
Temperatura (°C)	27 00
pH	7 69
Conductividad	380 00 μ S/cm

Suma de Aniones	3 12 meq/L
Suma de Cationes	3 60 meq/L
Balance	7 03 %

Total Disueltos Solidos	705 54 mg/L
Dureza Total	133 51 mg/l CaCO3
Alcalinidad	60 04 mg/l CaCO3

Composición del Mejor Ion	mg/l	mmol/l	meq/l
Na	16 07	0 70	0 70
K	8 99	0 230	0 230
Ca	40 83	1 02	2 04
Mg	7 66	0 32	0 63
Cl	41 30	1 16	1 16
SO4	24 53	0 26	0 51
NO3	19 02	0 24	0 24
HCO3	73 20	1 20	1 20

Relaciones Iónicas	mg/l	mmol/l	mg/l	mmol/l
	Comparación de Agua de Mar			
Ca/Mg	5 33	3 23	0 319	0 194
Ca/SO4	1 66	3 99	0 152	0 364
Na/Cl	0 39	0 60	0 556	0 858
Cl/Br	103	233	287	648

Reporte de Analisis Quimico de Laboratorio

Nombre ID	PCH08
Nombre Date	
Localización	Punta Chame
Geología	arena
Tipo de Agua	Ca Na Cl HCO ₃ SO ₄
Temperatura (C)	27 00
pH	7 59
Conductividad	381 00 μ S/cm
Suma de Aniones	3 63 meq/L
Suma de Cationes	3 47 meq/L
Balance	2 36 %
Total Disueltos Solidos	757 87 mg/L
Dureza Total	128 73 mg/l CaCO ₃
Alcalinidad	58 56 mg/l CaCO ₃

Composición del Mejor Ion	mg/l	mmol/l	meq/l
Na	18 23	0 79	0 79
K	3 95	0 101	0 101
Ca	39 36	0 98	1 96
Mg	7 39	0 30	0 61
Cl	52 20	1 47	1 47
SO ₄	35 48	0 37	0 74
NO ₃	19 20	0 25	0 25
HCO ₃	71 40	1 17	1 17

Relaciones Iónicas	Comparación de Agua de Mar			
	mg/l	mmol/l	mg/l	mmol/l
Ca/Mg	5 33	3 23	0 319	0 194
Ca/SO ₄	1 11	2 66	0 152	0 364
Na/Cl	0 35	0 54	0 556	0 858
Cl/Br	104	235	287	648

Reporte de Análisis Químico de Laboratorio

Nombre ID	PCH09
Nombre Date	
Localización	Punta Chame
Geología	arena
Tipo de Agua	Ca Na HCO ₃ Cl
Temperatura (°C)	27 00
pH	7 55
Conductividad	391 00 μ S/cm

Suma de Aniones	3 00 meq/L
Suma de Cationes	3 53 meq/L
Balance	8 18 %

Total Disueltos Solidos	942 83 mg/L
Dureza Total	125 36 mg/l CaCO ₃
Alcalinidad	72 59 mg/l CaCO ₃

Composicion del Mejor Ion	mg/l	mmol/l	meq/l
Na	18 56	0 81	0 81
K	8 56	0 219	0 219
Ca	39 71	0 99	1 98
Mg	6 36	0 26	0 52
Cl	38 30	1 08	1 08
SO ₄	16 56	0 17	0 35
NO ₃	9 11	0 12	0 12
HCO ₃	88 50	1 45	1 45

Relaciones Iónicas	mg/l	mmol/l	mg/l	mmol/l
	Comparación de Agua de Mar			
Ca/Mg	6 24	3 79	0 319	0 194
Ca/SO ₄	2 40	5 74	0 152	0 364
Na/Cl	0 48	0 75	0 556	0 858
Cl/Br	96	216	287	648

Reporte de Análisis Químico de Laboratorio

Nombre ID	PCH10
Nombre Date	
Localización	Punta Chame
Geología	arena
Tipo de Agua	Ca Na Mg HCO3 Cl
Temperatura (C)	27 00
pH	8 59
Conductividad	458 00 uS/cm
Suma de Aniones	3 54 meq/L
Suma de Cationes	3 81 meq/L
Balance	3 63 %
Total Disueltos Sólidos	843 57 mg/L
Dureza Total	114 20 mg/l CaCO3
Alcalinidad	87 10 mg/l CaCO3

Composición del Mejor Ion	mg/l	mmol/l	meq/l
Na	26 20	1 14	1 14
K	15 25	0 390	0 390
Ca	26 12	0 65	1 30
Mg	11 89	0 49	0 98
Cl	36 70	1 04	1 04
SO4	21 85	0 23	0 46
NO3	24 05	0 31	0 31
HCO3	106 20	1 74	1 74

Relaciones Iónicas	Comparación de Agua de Mar			
	mg/l	mmol/l	mg/l	mmol/l
Ca/Mg	2 20	1 33	0 319	0 194
Ca/SO4	1 20	2 86	0 152	0 364
Na/Cl	0 71	1 10	0 556	0 858
Cl/Br	92	207	287	648

Reporte de Análisis Químico de Laboratorio

Nombre ID	PCH11
Nombre Date	
Localización	Punta Chame
Geología	arena
Tipo de Agua	Ca Mg HCO3 Cl
Temperatura (C)	27 00
pH	8 11
Conductividad	480 00 μ S/cm
Suma de Aniones	3 75 meq/L
Suma de Cationes	4 44 meq/L
Balance	8 41 %
Total Disueltos Sólidos	944 23 mg/L
Dureza Total	191 35 mg/l CaCO3
Alcalinidad	96 45 mg/l CaCO3

Composición del Mejor Ion	mg/l	mmol/l	meq/l
Na	12 10	0 53	0 53
K	3 35	0 086	0 086
Ca	53 70	1 34	2 68
Mg	13 90	0 57	1 14
Cl	45 40	1 28	1 28
SO4	15 59	0 16	0 32
NO3	16 36	0 21	0 21
HCO3	117 60	1 93	1 93

Relaciones Iónicas	Comparación de Agua de Mar			
	mg/l	mmol/l	mg/l	mmol/l
Ca/Mg	3 86	2 34	0 319	0 194
Ca/SO4	3 44	8 25	0 152	0 364
Na/Cl	0 27	0 41	0 556	0 858
Cl/Br	1 14	256	287	648

Reporte de Analisis Quimico de Laboratorio

Nombre ID	PCH12
Nombre Date	
Localización	Punta Chame
Geologia	arena
Tipo de Agua	Ca Cl HCO ₃
Temperatura (°C)	27 00
pH	7 98
Conductividad	567 00 μ S/cm

Suma de Aniones	6 22 meq/L
Suma de Cationes	5 32 meq/L
Balance	7 81 %

Total Disueltos Sólidos	1128 06 mg/L
Dureza Total	217 86 mg/l CaCO ₃
Alcalinidad	100 64 mg/l CaCO ₃

Composicion del Mejor Ion	mg/l	mmol/l	meq/l
Na	19 65	0 85	0 85
K	4 26	0 109	0 109
Ca	66 82	1 67	3 33
Mg	12 38	0 51	1 02
Cl	120 80	3 41	3 41
SO ₄	28 02	0 29	0 58
NO ₃	15 99	0 20	0 20
HCO ₃	122 70	2 01	2 01

Relaciones Iónicas	mg/l	mmol/l	mg/l	mmol/l
		Comparación de Agua de Mar		
Ca/Mg	5 40	3 27	0 319	0 194
Ca/SO ₄	2 38	5 71	0 152	0 364
Na/Cl	0 16	0 25	0 556	0 858
Cl/Br	134	303	287	648

Reporte de Análisis Químico de Laboratorio

Nombre ID	PCH13
Nombre Date	
Localización	Punta Chame
Geología	arena
Tipo de Agua	Ca-Mg-Cl-HCO ₃
Temperatura (°C)	27,00
pH	7,92
Conductividad	690,00 μ S/cm

Suma de Aniones	5,55 meq/L
Suma de Cationes	5,67 meq/L
Balance	-1,06 %

Total Disueltos Sólidos	1136,53 mg/L
Dureza Total	224,04 mg/l CaCO ₃
Alcalinidad	84,40 mg/l CaCO ₃

Composición del Mejor Ion	mg/l	mmol/l	meq/l
Na	22,95	1,00	1,00
K	7,61	0,195	0,195
Ca	62,19	1,55	3,10
Mg	16,69	0,69	1,37
Cl	103,00	2,91	2,91
SO ₄	32,48	0,34	0,68
NO ₃	20,08	0,26	0,26
HCO ₃	102,90	1,69	1,69

Relaciones Iónicas	mg/l	mmol/l	mg/l	mmol/l
			Comparación de Agua de Mar	
Ca/Mg	3,73	2,26	0,319	0,194
Ca/SO ₄	1,91	4,59	0,152	0,364
Na/Cl	0,22	0,34	0,556	0,858
Cl/Br	52	116	287	648

Reporte de Análisis Químico de Laboratorio

Nombre ID	PCH14
Nombre Date	
Localización	Punta Chame
Geología	arena
Tipo de Agua	Ca-Cl-HCO ₃
Temperatura (°C)	27,00
pH	7,88
Conductividad	389,00 μ S/cm

Suma de Aniones	3,57 meq/L
Suma de Cationes	3,79 meq/L
Balance	-3,05 %

Total Disueltos Sólidos	1058,25 mg/L
Dureza Total	150,08 mg/l CaCO ₃
Alcalinidad	62,74 mg/l CaCO ₃

Composición del Mejor Ion	mg/l	mmol/l	meq/l
Na	15,40	0,67	0,67
K	4,77	0,122	0,122
Ca	47,02	1,17	2,35
Mg	7,93	0,33	0,65
Cl	59,10	1,67	1,67
SO ₄	15,07	0,16	0,31
NO ₃	25,11	0,32	0,32
HCO ₃	76,50	1,25	1,25

Relaciones Iónicas	mg/l	mmol/l	mg/l	mmol/l
	Comparación de Agua de Mar			
Ca/Mg	5,93	3,60	0,319	0,194
Ca/SO ₄	3,12	7,47	0,152	0,364
Na/Cl	0,26	0,40	0,556	0,858
Cl/Br	74	167	287	648

Reporte de Análisis Químico de Laboratorio

Nombre ID	PCH15
Nombre Date	
Localización	Punta Chame
Geología	arena
Tipo de Agua	Ca-Mg-Na-Cl-HCO ₃
Temperatura (°C)	27,00
pH	8,09
Conductividad	295,00 μ S/cm

Suma de Aniones	2,98 meq/L
Suma de Cationes	3,23 meq/L
Balance	-4,13 %

Total Disueltos Sólidos	1033,48 mg/L
Dureza Total	119,62 mg/l CaCO ₃
Alcalinidad	63,97 mg/l CaCO ₃

Composición del Mejor Ion	mg/l	mmol/l	meq/l
Na	14,53	0,63	0,63
K	8,24	0,211	0,211
Ca	33,57	0,84	1,68
Mg	8,69	0,36	0,72
Cl	54,40	1,53	1,53
SO ₄	5,50	0,06	0,11
NO ₃	3,24	0,04	0,04
HCO ₃	78,00	1,28	1,28

Relaciones Iónicas	mg/l	mmol/l	mg/l	mmol/l
Ca/Mg	3,86	2,34	0,319	0,194
Ca/SO ₄	6,10	14,62	0,152	0,364
Na/Cl	0,27	0,41	0,556	0,858
Cl/Br	91	204	287	648

Reporte de Análisis Químico de Laboratorio

Nombre ID	PCH16
Nombre Date	
Localización	Punta Chame
Geología	arena
Tipo de Agua	Ca Mg Na HCO ₃ Cl
Temperatura (°C)	27 00
pH	8 04
Conductividad	624 00 μ S/cm
Suma de Aniones	4 83 meq/L
Suma de Cationes	5 51 meq/L
Balance	6 54 %
Total Disueltos Sólidos	1332 57 mg/L
Dureza Total	205 04 mg/l CaCO ₃
Alcalinidad	112 20 mg/l CaCO ₃

Composición del Mejor Ion	mg/l	mmol/l	meq/l
Na	27 45	1 19	1 19
K	8 42	0 215	0 215
Ca	52 70	1 31	2 63
Mg	17 83	0 73	1 47
Cl	79 00	2 23	2 23
SO ₄	7 74	0 08	0 16
NO ₃	13 73	0 18	0 18
HCO ₃	136 80	2 24	2 24

Relaciones Iónicas	Comparación de Agua de Mar			
	mg/l	mmol/l	mg/l	mmol/l
Ca/Mg	2 96	1 79	0 319	0 194
Ca/SO ₄	6 81	16 31	0 152	0 364
Na/Cl	0 35	0 54	0 556	0 858
Cl/Br	44	99	287	648

Reporte de Analisis Quimico de Laboratorio

Nombre ID	PCH17
Nombre Date	
Localización	Punta Chame
Geologia	arena
Tipo de Agua	Ca Cl HCO ₃
Temperatura (C)	27 00
pH	7 95
Conductividad	621 00 μ S/cm

Suma de Aniones	3 04 meq/L
Suma de Cationes	3 09 meq/L
Balance	0 76 %

Total Disueltos Sólidos	1184 70 mg/L
Dureza Total	125 89 mg/l CaCO ₃
Alcalinidad	58 81 mg/l CaCO ₃

Composición del Mejor Ion	mg/l	mmol/l	meq/l
Na	11 66	0 51	0 51
K	2 64	0 068	0 068
Ca	39 97	1 00	1 99
Mg	6 33	0 26	0 52
Cl	59 20	1 67	1 67
SO ₄	6 04	0 06	0 13
NO ₃	4 04	0 05	0 05
HCO ₃	71 70	1 18	1 18

Relaciones Iónicas	mg/l	mmol/l	mg/l	mmol/l
	Comparación de Agua de Mar			
Ca/Mg	6 31	3 83	0 319	0 194
Ca/SO ₄	6 62	15 85	0 152	0 364
Na/Cl	0 20	0 30	0 556	0 858
Cl/Br	35	78	287	648

Reporte de Analisis Quimico de Laboratorio

Nombre ID	PCH18
Nombre Date	
Localización	Punta Chame
Geologia	arena
Tipo de Agua	Ca Na Cl HCO3
Temperatura (°C)	27 00
pH	7 85
Conductividad	648 00 μ S/cm

Suma de Aniones	5 30 meq/L
Suma de Cationes	5 54 meq/L
Balance	2 21 %

Total Disueltos Sólidos	1355 23 mg/L
Dureza Total	194 00 mg/l CaCO3
Alcalinidad	107 03 mg/l CaCO3

Composición del Mejor Ion	mg/l	mmol/l	meq/l
Na	33 17	1 44	1 44
K	8 48	0 217	0 217
Ca	58 70	1 46	2 93
Mg	11 51	0 47	0 95
Cl	81 00	2 28	2 28
SO4	29 76	0 31	0 62
NO3	14 62	0 19	0 19
HCO3	130 50	2 14	2 14

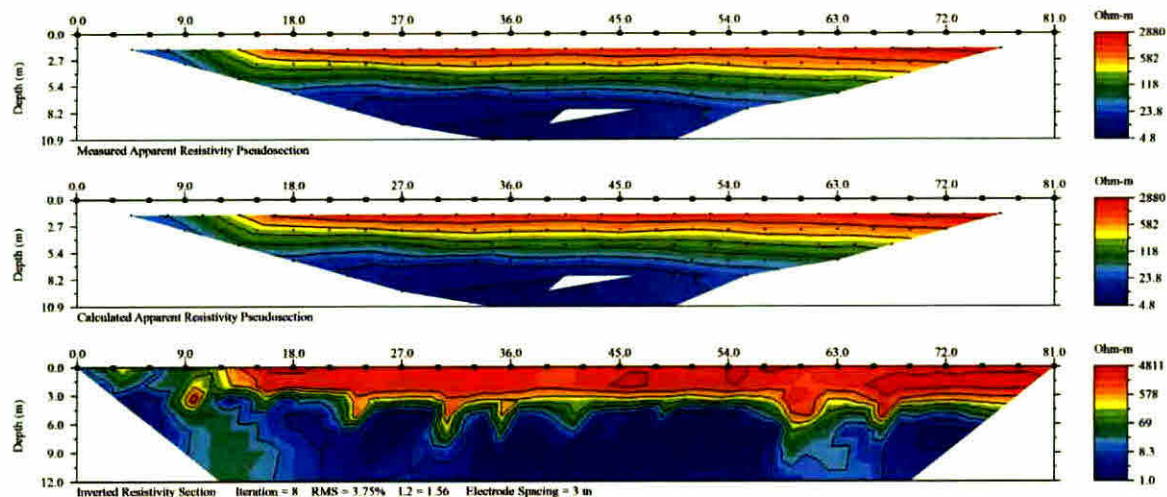
Relaciones Iónicas	mg/l	mmol/l	mg/l	mmol/l
Ca/Mg	5 10	3 09	0 319	0 194
Ca/SO4	1 97	4 72	0 152	0 364
Na/Cl	0 41	0 63	0 556	0 858
Cl/Br	15	34	287	648

Comparación de Agua de Mar

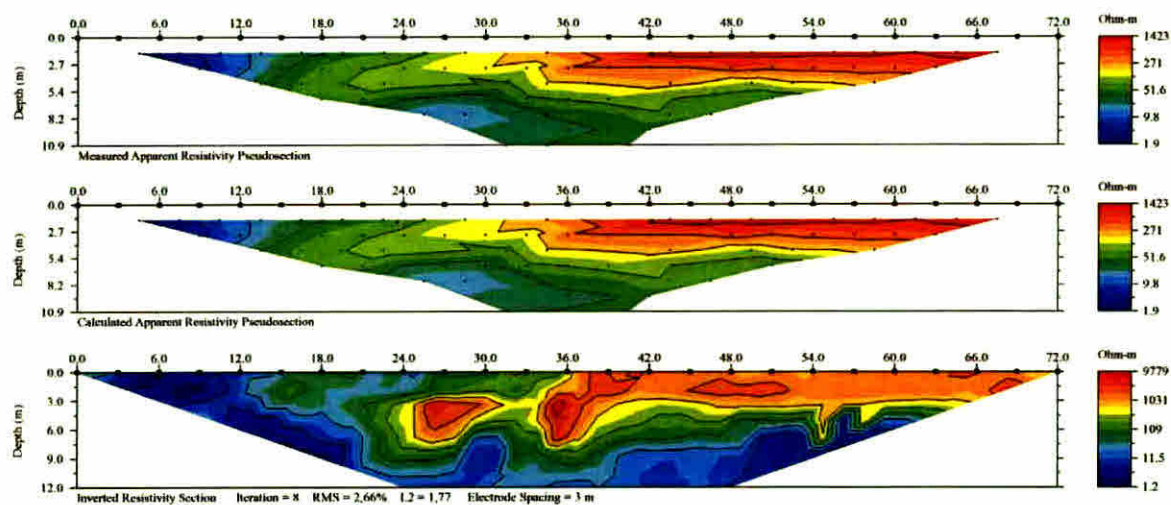
ANEXOS B

TOMOGRAFIAS ELÉCTRICAS REALIZADAS EN PUNTA CHAME

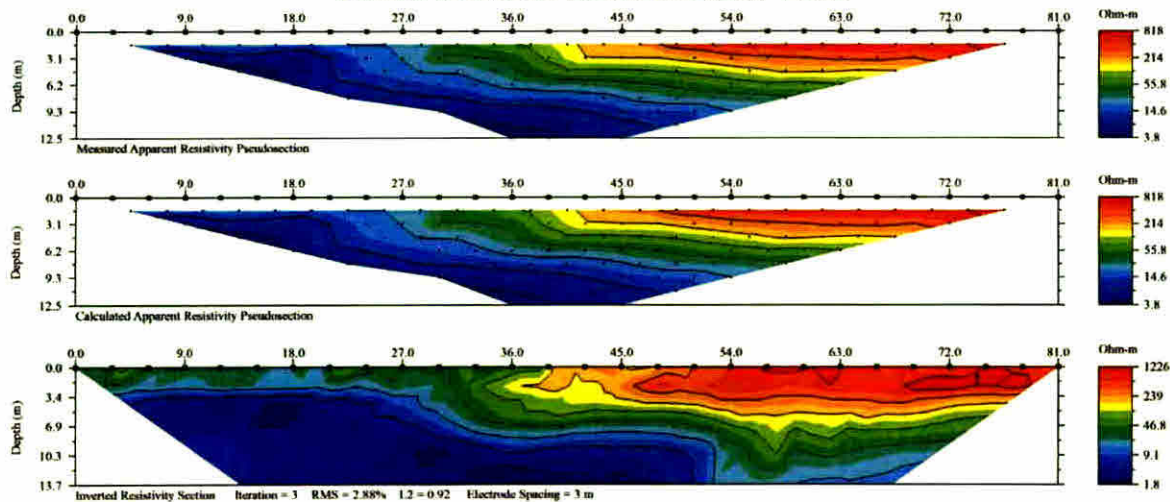
TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA: TE01



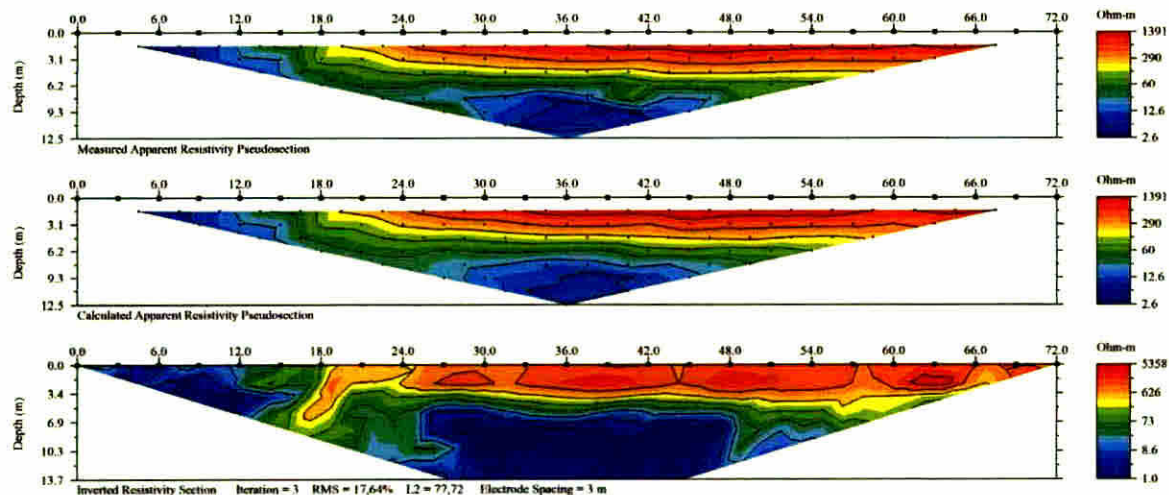
TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA: TE02



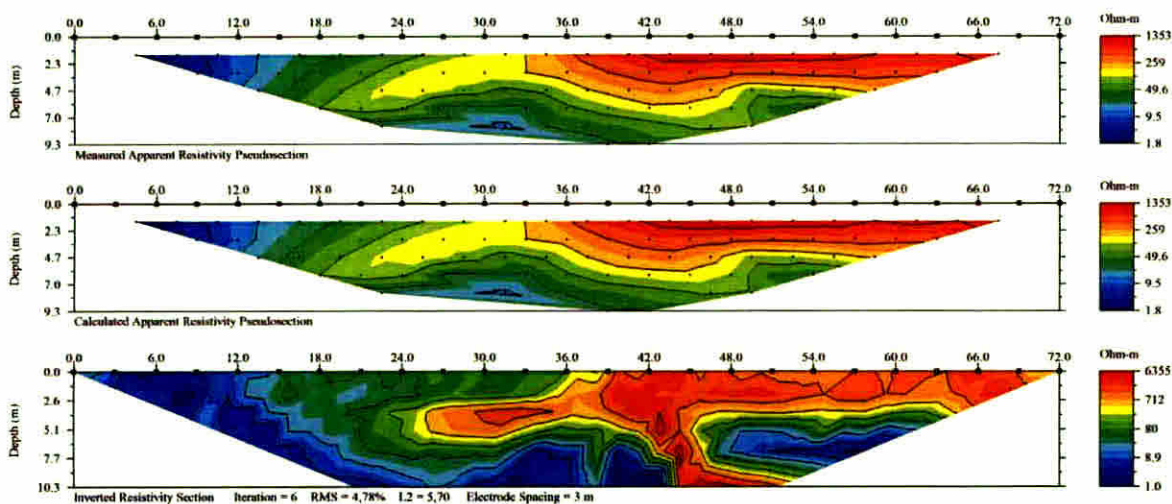
TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA: TE03



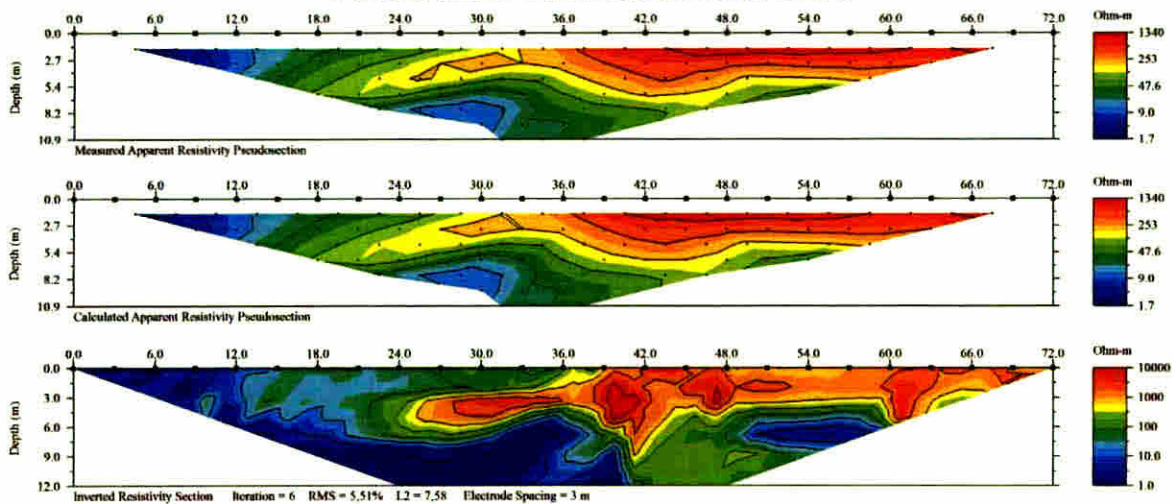
TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA: TE04



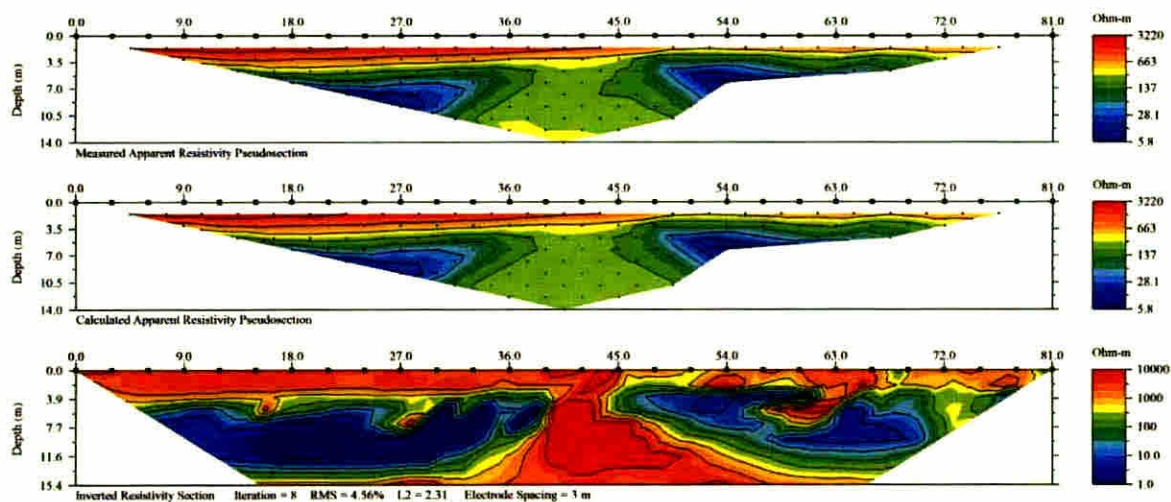
TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA: TE05



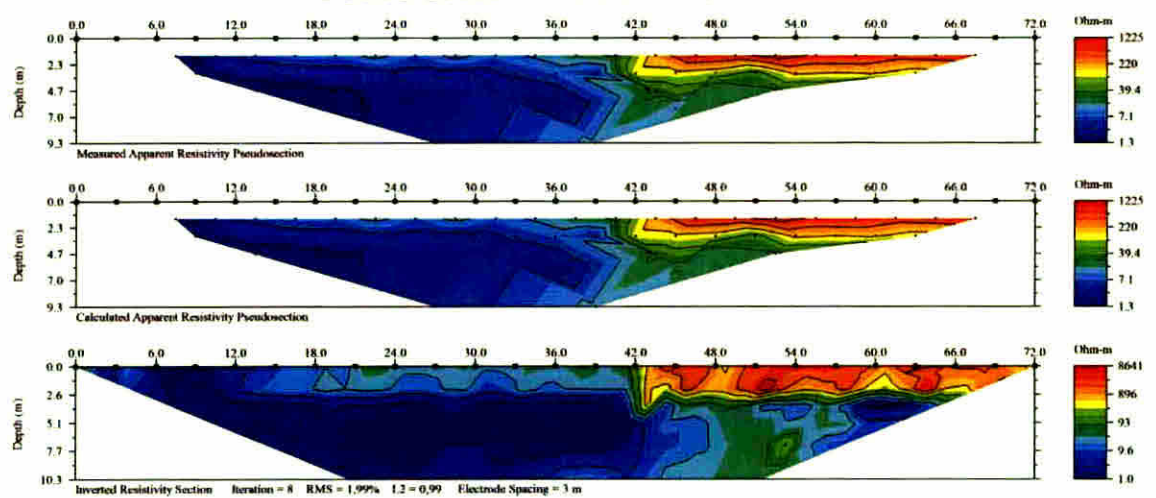
TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA: TE06



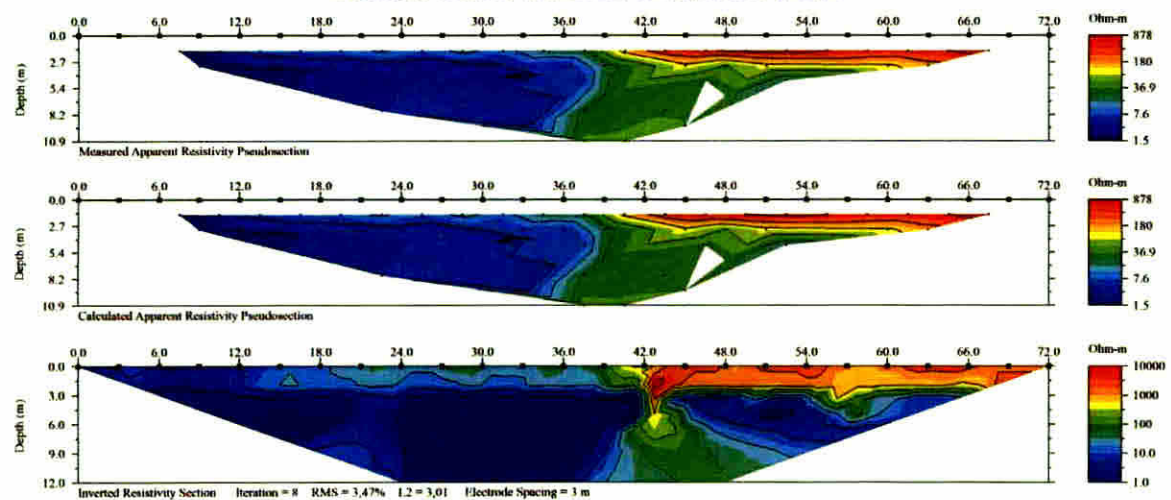
TOMOGRFÍA ELÉCTRICA: TE07



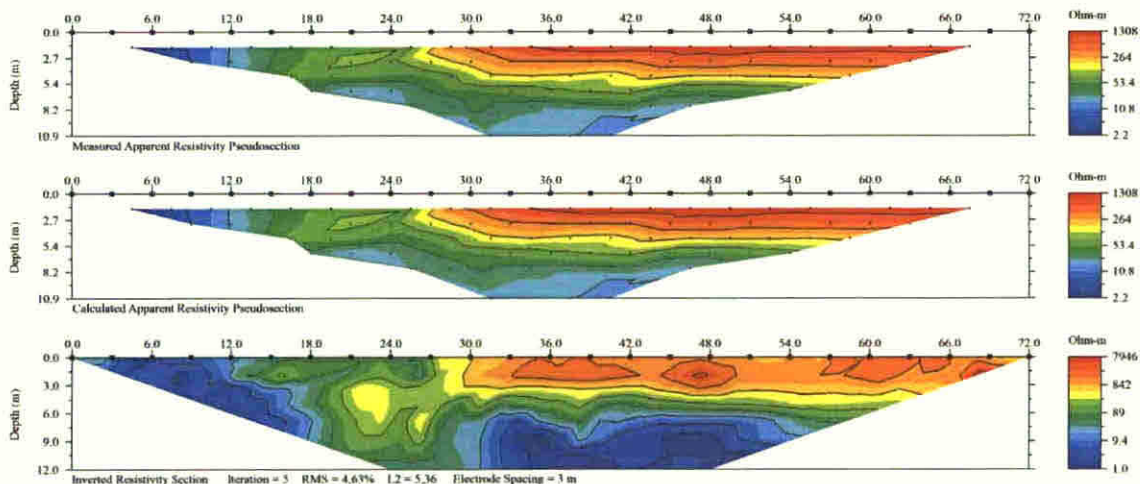
TOMOGRFÍA ELÉCTRICA: TE08



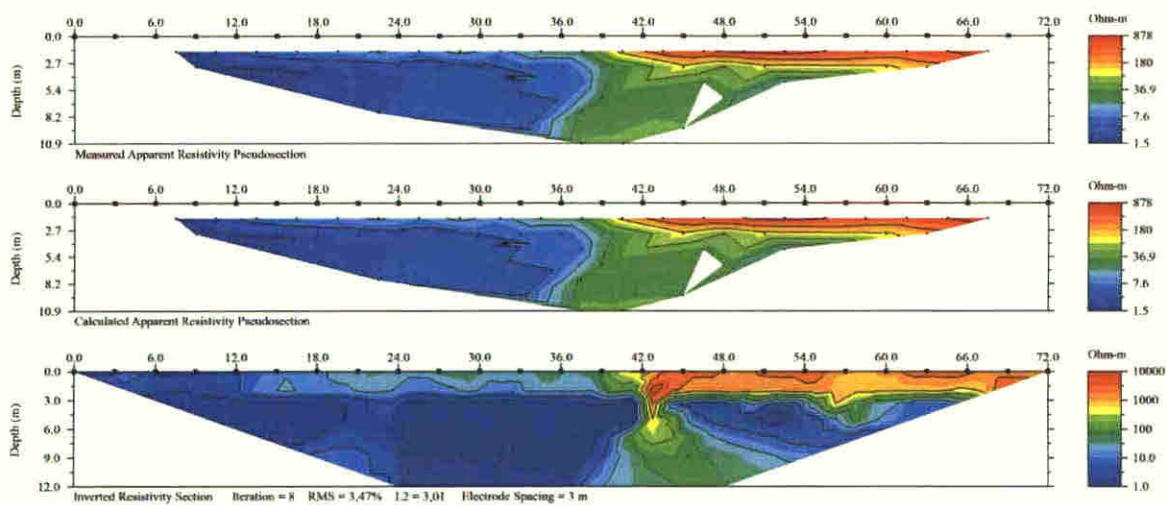
TOMOGRFÍA ELÉCTRICA: TE09



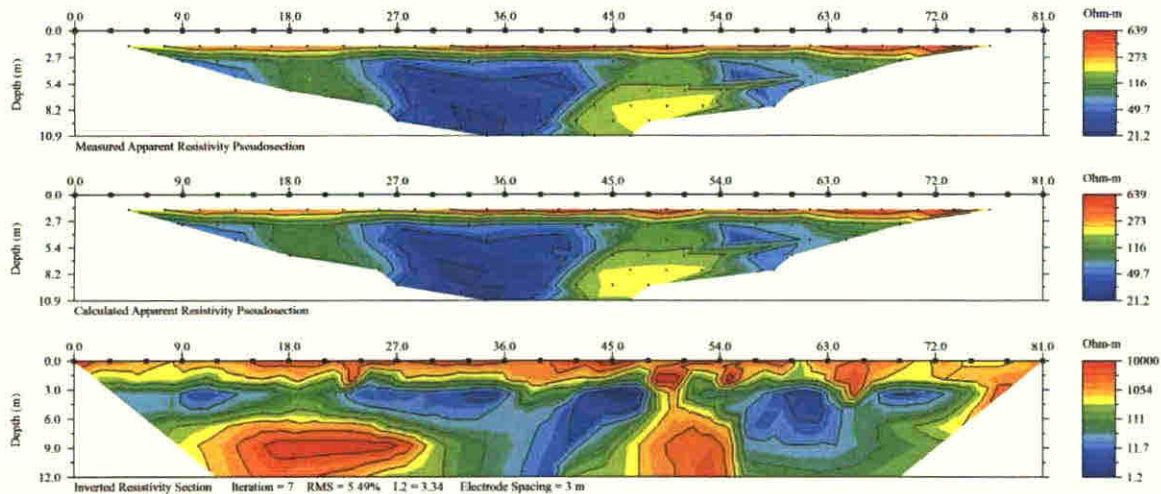
TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA: TE10



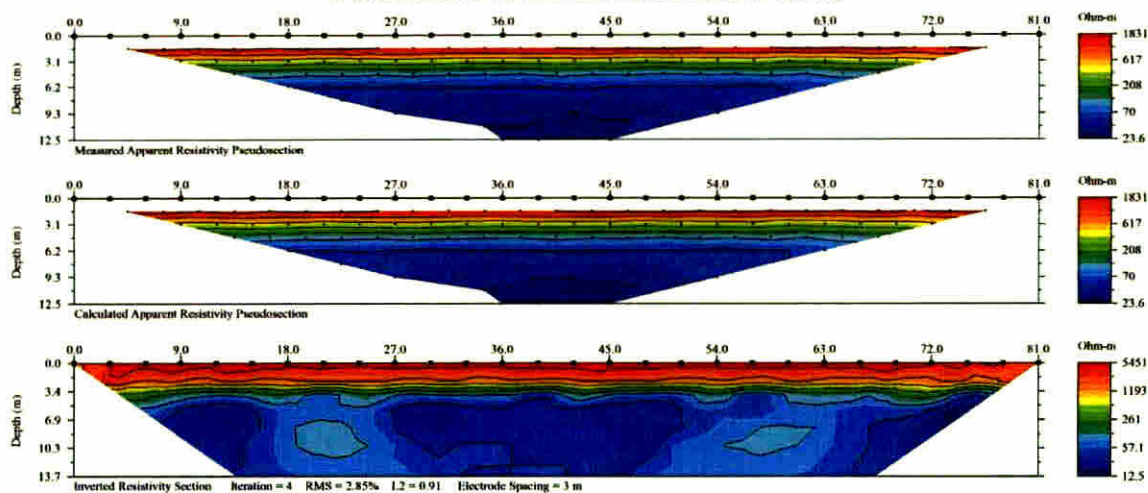
TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA: TE11



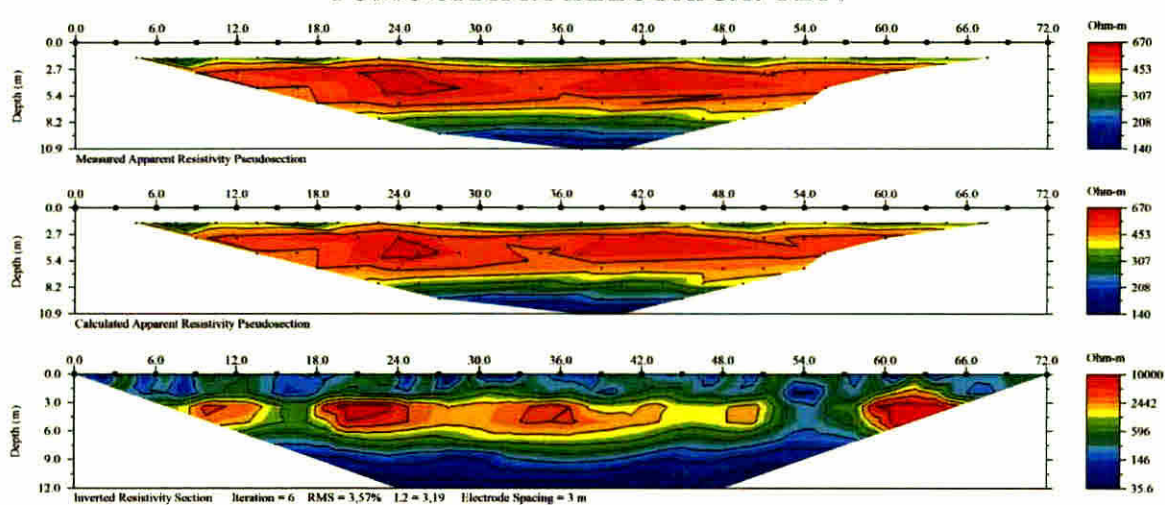
TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA: TE12



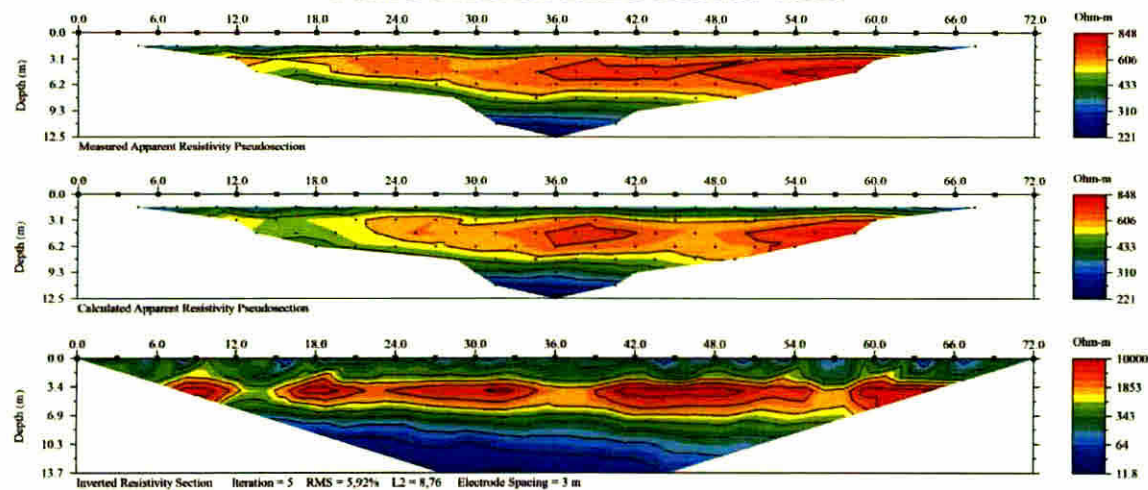
TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA: TE13



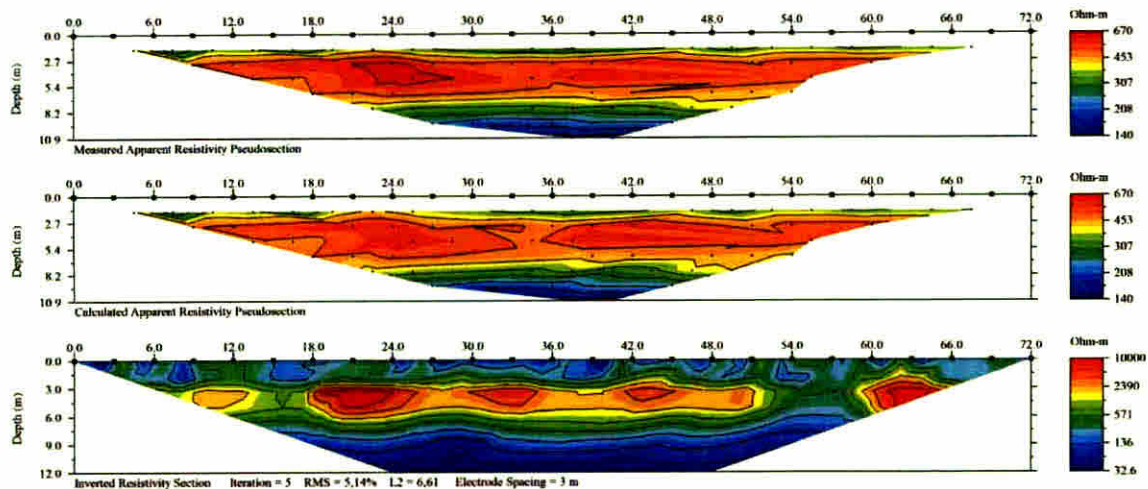
TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA: TE14



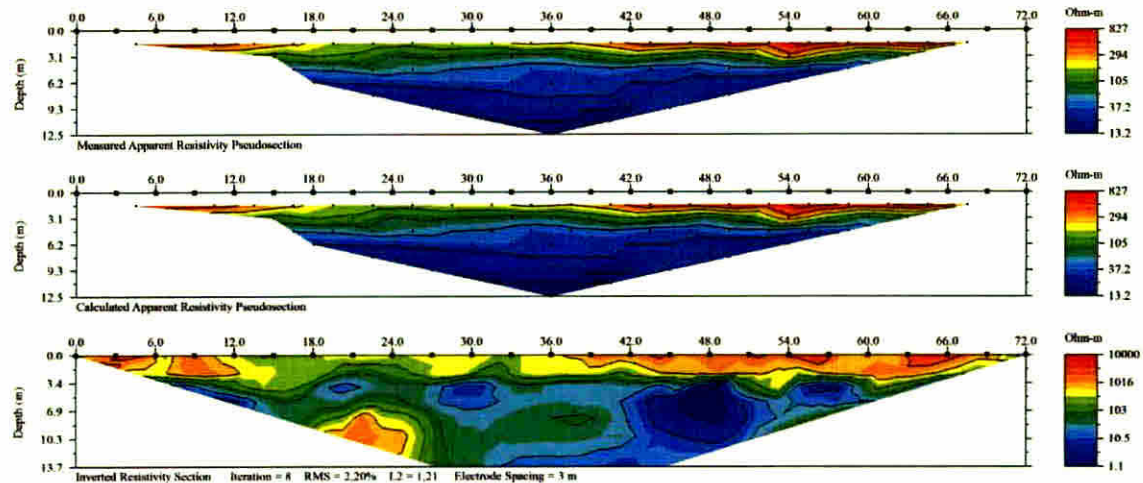
TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA: TE15



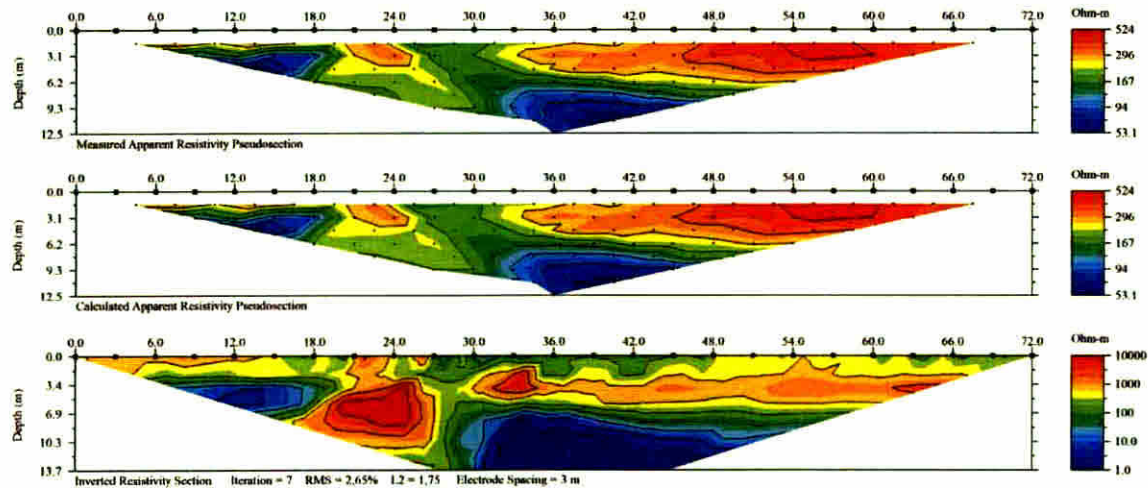
TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA: TE16



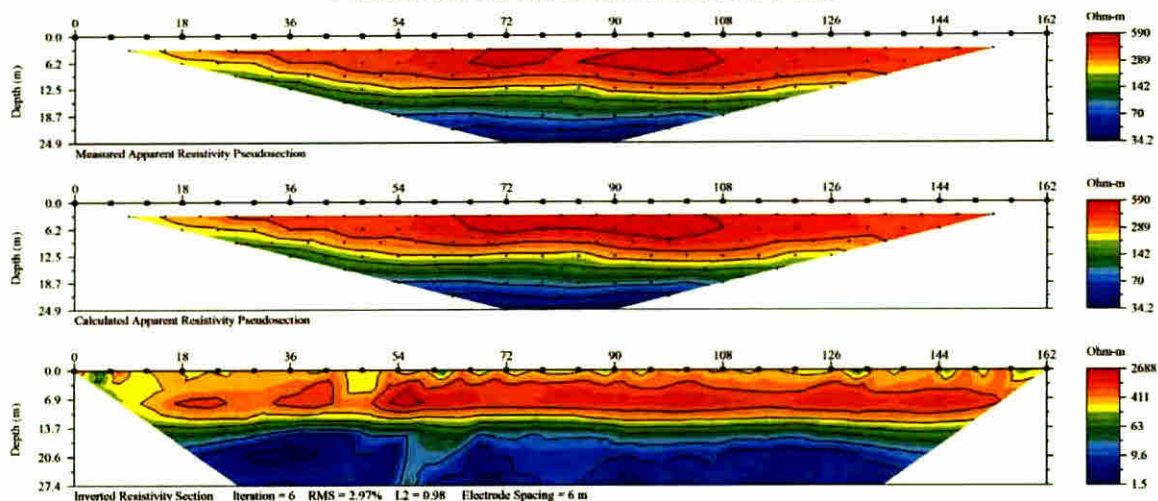
TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA: TE17



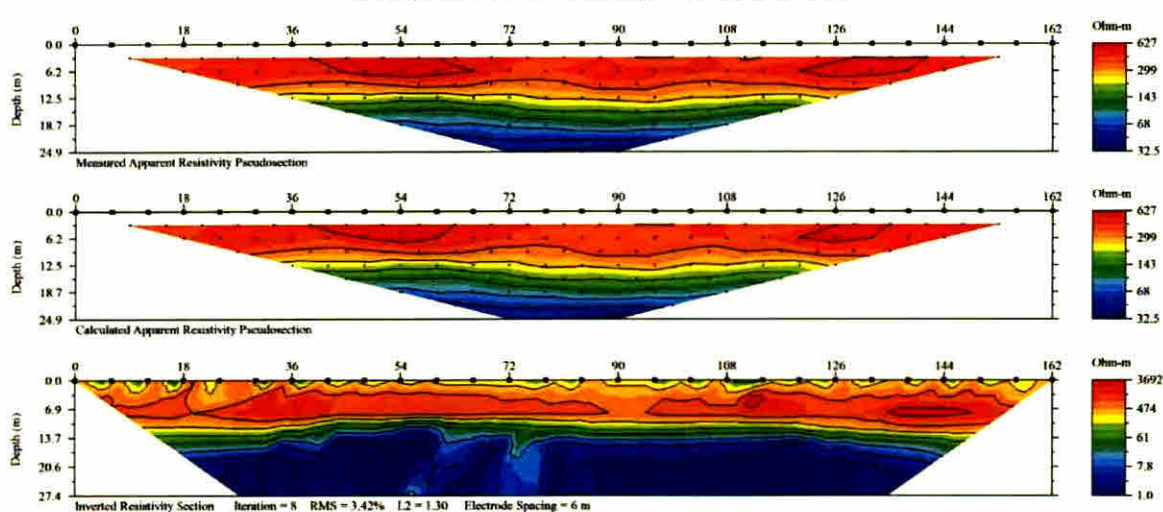
TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA: TE18



TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA: TE19



TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA: TE20



TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA: TE21

